

Movement Science Group, Abteilung für Pferdechirurgie, Universitätspferdeklinik, Department für Kleintiere und Pferde, Veterinärmedizinische Universität Wien

# Objektive Messverfahren zur Bestimmung von Reitbodeneigenschaften und deren Einfluss auf den Bewegungsapparat des Pferdes – Ein Überblick

J. Hruza\* und C. Peham

Eingelangt am 5. September 2023  
Angenommen am 19. November 2023  
Veröffentlicht am 8. Dezember 2023

**Schlüsselwörter:** Pferdesport, Bodeneigenschaften, Reitplatz, Rennbahn, Messgeräte, Biomechanik.

**Keywords:** Equestrian, Surface Properties, Riding Surface, Racetrack, Measuring Devices, Biomechanics.

## ■ Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Überblick über die Methoden zur Messung von Reitbodeneigenschaften, sowie zu den bisher bekannten Einflüssen dieser Eigenschaften auf den Bewegungsapparat des Pferdes gegeben. Der Fokus liegt auf Messmethoden für mechanische Eigenschaften, welche sehr vielfältig sind und von einfachen, unidirektional messenden bis hin zu komplexen Apparaten reichen, die versuchen, den Bewegungsablauf des Pferdes möglichst genau nachzuahmen. Außerdem gibt es Geräte, die *in vivo* die mechanische Interaktion zwischen Gliedmaße und Boden direkt messen. Eine Kombination verschiedener Methoden, sowie das Einbeziehen anderer Bodeneigenschaften und äußerer Einflüsse ist sinnvoll, um aussagekräftigere und vergleichbarere Schlüsse über Böden und deren Auswirkung auf Pferde zu ziehen. Dazu gehören z.B. die Bodenzusammensetzung, Wetterdaten, Pflegemaßnahmen, aber auch epidemiologische Verletzungsdaten der Pferde oder Computersimulationen. Bis heute gibt es bei Pferdesportveranstaltungen kaum ein Reglement zu verwendeten Böden, jedoch werden deren Effekte auf Leistung und Sicherheit der Pferde mit fortschreitenden Untersuchungen immer offensichtlicher. Einige Faktoren wie z.B. die Boden Härte, Scherfestigkeit oder Kraftreduktion beim Aufußeln sind für ihre Relevanz diesbezüglich bekannt und in einer Vielzahl an Böden untersucht. Anhand solcher Daten gab es beispielsweise im Pferdesport bereits zahlreiche Anpassungen hin zu sichererem Bodenmaterial, eine Optimierung von Pflege und Management der Böden, sowie teilweise die Etablierung verpflichtender Bodentestungen. In jeder Reitsportdisziplin liegen

## ■ Summary

### Objective Methods for Measuring Riding Surface Properties and their Influence on the Musculoskeletal System of the Horse – Review

This paper presents an overview of the methods for measuring riding surface properties, as well as the known influences of these properties on the musculoskeletal system of the horse. The focus is on methods for measuring mechanical properties. They are very diverse and range from simple, unidirectional methods to complex apparatuses that aim to mimic the horse's movement as closely as possible. There are also devices that measure the mechanical interaction between the limb and the ground directly *in vivo*. A combination of methods, and incorporating other surface properties and external influences, is useful in drawing meaningful and comparable conclusions about surfaces and their effects on horses. These include substrate composition, weather data and maintenance practices, as well as epidemiological equine injury data and computer simulations. There are still few regulations on surfaces used in equestrian events but their effects on horse performance and safety are becoming more apparent as research progresses. Factors such as hardness, shear strength and force reduction at footing are known to be relevant in this regard and have been studied in a variety of surface types. The data have led to numerous adaptations in equestrian sports, for example towards safer soil material, an optimization of the maintenance and management of the surfaces and the establishment of obligatory soil testing, which varies from region to region. In each equestrian discipline

\*E-Mail: julia.hruza@vetmeduni.ac.at

andere Belastungsmuster, Risikofaktoren und Pathologien zugrunde und es besteht, insbesondere in Disziplinen abseits des Rennsportes, noch viel Raum für Forschung und weitere Optimierung der verwendeten Böden.

## ■ Einleitung

Als Steppen- und Fluchttiere sind Pferde evolutionär an effektive Fortbewegung auf trockenen Grasböden angepasst (Dohms-Warnecke et al. 2021; Librado et al. 2021). In der modernen Pferdehaltung werden Pferde in der Regel auf bewirtschafteten, künstlich geschaffenen und häufig überdachten Böden gehalten und trainiert (Henderson 2007; Hotchkiss et al. 2007; Kruse et al. 2012; Egenvall et al. 2021). Diese Abweichungen von natürlichen Boden- und Bewegungsverhältnissen erfordern Anpassungen wie z.B. die übliche Bearbeitung und den Beschlag der Hufe, die mit dem Bodenmaterial in Kontakt stehen. Doch der Einfluss des Bodens auf den Bewegungsapparat des Pferdes und dessen Biomechanik geht weit über die Funktion und Gesundheit der Hufe hinaus. Die vielfältigen Effekte auf den gesamten Bewegungsapparat spiegeln sich beispielsweise im Rennsport wider, wo sich die Art des Bodenmaterials signifikant auf die Leistung, aber auch auf die Verletzungsrate auswirkt (Boden et al. 2007; Maeda et al. 2012; Parkes & Witte 2015). Auch bei anderen Pferdesportarten wird den Bodeneigenschaften bei der Entstehung orthopädischer Erkrankungen eine Bedeutung beigemessen (Dyson 2002; Murray et al. 2010a,b). In der tierärztlichen Lahmheitsdiagnostik werden harte und weiche Böden zur Charakterisierung der Lahmheit verwendet, da sich je nach zugrundeliegender Pathologie die Symptome auf verschiedenen Böden mehr oder weniger deutlich oder andersartig darstellen (Ross 2011; Dyson & Greve 2016; Pfau et al. 2021; Marunova et al. 2022). Zur Rehabilitation erkrankter Pferde macht man sich Bodeneigenschaften zunutze, indem man z.B. von Knochen- oder Gelenkerkrankungen betroffene Pferde eher auf weichem Boden bewegt (Snow 2011). Zusammenfassend spielen Bodeneigenschaften nicht nur bei der Entstehung, sondern auch bei der Genesung und Prävention orthopädischer Erkrankungen eine Rolle. Die Wahl des geeigneten Bodens hat nicht nur medizinische, sondern auch wirtschaftliche und tier-schutzrelevante Bedeutung.

Im Reitsport werden Böden bis heute häufig nach subjektiv wahrgenommenen Eigenschaften charakterisiert. Typische Bezeichnungen sind z.B. „hart“, „weich“, „rutschig“, „schnell“ oder „tief“ (Dufour & Mumford 2008; Murray et al. 2010b; Marquardt 2014), anhand derer Rückschlüsse auf das Pferd und dessen Leistung gezogen werden. Mit verschiedenen Messmethoden werden Pferdesportböden etwa seit Mitte der 1970er Jahre objektiv untersucht und Einflüsse auf das Pferd

there are different underlying loading patterns, risk factors and pathologies and there is much room for research and further optimization of the surfaces used, especially in disciplines other than racing.

wissenschaftlich beschrieben. Dieses Wissen soll dazu dienen, Böden in Zukunft gezielter einzusetzen, in ihren Eigenschaften zu optimieren und damit Leistungsparameter und Verletzungsraten im Pferdesport und in der Haltung zu verbessern.

In humanen Sportdisziplinen sind viele Einflüsse der Böden auf Leistung und Verletzungsraten bekannt, und es sind in vielen Sportarten Untersuchungen und Vorschriften für Wettkampfböden etabliert (Aldahir & McElroy 2014; Benetti 2022a). Im Pferdesport gibt es nur wenig offizielles Reglement für Wettkämpfe. Die Qualität von Rennstrecken wird meist subjektiv vor den Rennen bestimmt, während in manchen Ländern nun objektive Messverfahren eingesetzt werden. In Neuseeland, Australien und dem Vereinigten Königreich werden penetrometrische Messungen aller Rennstrecken vorgenommen (Australian Racecourse Managers Association Inc. 2007; New Zealand Thoroughbred Racing 2022; British Horseracing Authority 2023). Im Jahr 2021 wurden Regularien für Rennstrecken der amerikanischen Horseracing Integrity and Safety Authority (2022) etabliert, die Eigenschaften und Sicherheitskriterien der Böden vorschreibt. Der internationale Pferdesportverband Fédération Equestre Internationale (FEI) hat die Zusammenstellung des Equine Surfaces White Paper (Hobbs et al. 2014) unterstützt und dieses veröffentlicht, schreibt jedoch keine Anforderungen für Wettkämpfe vor.

Die Messgeräte und -methoden, die Bodeneigenschaften im Human- und Pferdesportbereich untersuchen, sind sehr vielfältig. Sie reichen beispielsweise von Laboruntersuchungen über einfache und komplexe mechanische Testverfahren, direkt am Athleten angebrachte Messinstrumente, kinematische Messungen, epidemiologische Datensammlungen oder Computersimulationen. Jede Methode bietet unterschiedliche Möglichkeiten für wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn und Schlussfolgerungen, und eine Kombination verschiedener Methoden ist in der Regel für eine bessere Vergleichbarkeit und Interpretation der Daten sinnvoll. Wegen der Vielzahl an inneren und äußeren Einflüssen auf die Bodeneigenschaften, sowie der komplexen Effekte auf den Pferdekörper, sind Aussagen über einzelne Bodenmerkmale als Ursachen von z.B. Krankheitsprozessen eine große wissenschaftliche Herausforderung.

Ziel dieses Artikels ist es, eine Übersicht über die bisherige Forschung zu geben, die sich mit dem Einfluss von Bodeneigenschaften auf die Gesundheit und Leistung von Pferden befasst, und diese sowie die erzielten Erfolge zu diskutieren. Das Hauptaugenmerk

liegt hierbei auf mechanischen Bodeneigenschaften, aber auch über andere Eigenschaften soll ein Überblick gegeben werden.

## ■ Methoden

Im Rahmen einer Dissertation, die Eigenschaften von Grasböden mit dem Vienna Surface Tester untersucht, wurde eine Literaturrecherche zum Thema Böden im Pferdesport und deren Einfluss auf den Bewegungsapparat des Pferdes durchgeführt. Als Quellen wurden überwiegend wissenschaftliche Veröffentlichungen inklusive Review-Artikeln in Journalen mit Peer-Review ausgewertet, sowie vereinzelt Fachbücher zum Thema. Die Suche wissenschaftlicher Paper wurde mittels der Suchmaschinen Scopus, Web of Science und PubMed durchgeführt. Die Basissuche erfolgte mit den folgenden Stichwörtern und *Boolean Operators*, die in Titel, Abstract oder Keywords der Publikationen gesucht wurden: „\*horse\* OR \*equine\* OR \*equestrian\*“ AND „\*surface\* OR \*arena\* OR \*track\*“. Die insgesamt 22.002 Ergebnisse (PubMed: 1.997, Scopus: 5.874, Web of Science: 14.131) wurden eingeschränkt durch beispielsweise die Begrenzung auf themenrelevante Kategorien (z.B. „Veterinary Science“ oder „Soil Science“). Häufig vorkommende, nicht themenrelevante Begriffe wurden mittels *Boolean Operator* „(AND) NOT“ ausgeschlossen (z.B. „horseradish“, „teeth“). Die verbleibenden 11.151 Titel (PubMed: 1.871, Scopus: 4.034, Web of Science: 5.246) wurden auf Relevanz geprüft, entsprechend relevante Abstracts ausgewertet und schließlich von 386 Artikeln, Beiträgen oder Buchkapiteln der Volltext bezogen und ausgewertet. Mit Hilfe der Suchmaschine google.com wurden Informationen zu Regelwerken von Sportorganisationen oder Informationen von Herstellern über Geräte, Produkte und Messverfahren, sowie zur öffentlichen Diskussion des Themas zusammengetragen.

### Bezugsquellennachweis

AirFibr®: Natural Grass, Frankreich; Clegg Impact Tester®: Turf-Tec International, USA; Cushion Track: Equestrian Surfaces, UK; Fibrasand®, Mansfield Sand Company, UK; FieldTester: Turf-Tec International, USA; GoingStick®: TurfTrax Ltd, UK; Google®: Google Ireland Limited, Ireland; IN2-W-Turf-Tec Infiltrimeter: Turf-Tec International, USA; Polytrack®: Martin Collins Enterprises, UK; PubMed.gov®: National Center for Biotechnology Information, USA; Scopus: Elsevier B.V., Niederlande; Tapeta®: Michael Dickinson, Inc., USA; Turf Shear Tester® Model CCB1A: Baden Clegg PTY Ltd., Australien; Turf-Tec Shear Strength Tester: Turf-Tec International, USA; UtilityScan®: Geophysical Survey Systems, Inc., USA; Web of Science: Clarivate™, London, UK

## ■ Literaturübersicht

### Mit welchen Böden interagieren Pferde und wie werden deren Eigenschaften beeinflusst?

Pferde verbringen den Großteil des Tages stehend oder in langsamer Fortbewegung in ihrem Haltungssystem (Hotchkiss et al. 2007; Ninomiya et al. 2008; Dohms-Warnecke et al. 2021). Häufige Systeme sind z.B. freier Weidegang, Offenstallhaltung, Paddocks oder Boxen, wofür entsprechend unterschiedliche Böden zum Einsatz kommen. Gras-, Erde- oder Matschböden, deren Eigenschaften durch Wettereinflüsse (Al-Shayea 2001), Pflege und Nutzungsintensität (Vasco et al. 2020) stark variieren können, kommen in der Weidehaltung und Offenstallhaltung zum Einsatz. Auf Auslaufflächen oder in Innenräumen wird in der Regel befestigter Untergrund mit Sand, Sägespänen oder Stroh gepolstert, um eine Dämpfung zu erreichen und die Ausscheidungen der Pferde aufzunehmen (Dohms-Warnecke et al. 2021). Auch neue Materialien wie Hanf, Kokosnuss, Flachs oder Reis werden verwendet, um Hygiene, Feuchtigkeit und Pflegeaufwand positiv zu beeinflussen (Bambi et al. 2018). Gummi- oder Plastikmatten können als Zwischenschicht verwendet werden, um die Dämpfung und Rutschfestigkeit zu erhöhen (Ramsucht 2015). Die Auswirkung verschiedener Böden im Haltungssystem auf den Bewegungsapparat der Pferde ist bisher jedoch kaum erforscht. Für einige Erkrankungen der Gliedmaßen, wie z.B. Strahlfäule, Mauke, *White Line Disease*, Hufkrebs oder Hufabszesse sind Hygienemängel und ungünstige mechanische Eigenschaften des Bodens als Mitauslöser bekannt (Baxter et al. 2020).

Für Training und Wettkämpfe werden Pferde auf speziellen Reitplätzen und Arenen mit künstlich errichtetem oder bearbeitetem Boden bewegt. Diese Böden, vor allem Rennbahnen, sind bis heute im Fokus der Forschung. Je nach Verwendungszweck und regionaler Verfügbarkeit von Konstrukteuren und Materialien variieren die gewählten Böden und Oberflächen. Zum Einsatz als Tretschicht kommen Grasböden, Sandböden, Sandgemische mit organischen oder synthetischen Anteilen, wachsüberzogene Partikel und weniger häufig reine Holzschnitzel-, Plastik- oder Textilfaserböden. Bei künstlich errichteten Plätzen wird die Tretschicht auf einer meist mehrschichtigen Basis aus Drainageschichten und Tragschicht über dem Erdplanum aufgeschüttet (Stubbs & Neylan 2002; Hobbs et al. 2014). Auch diese tieferliegenden Schichten haben eine signifikante Auswirkung auf die Pferdegliedmaße (Holt et al. 2014; Symons et al. 2017).

Während verschiedene Bodenarten *per se* unterschiedliche Eigenschaften haben, variieren diese durch eine Vielzahl an internen und externen Einflüssen zusätzlich. Folgende interne Einflüsse sind beispielsweise bekannt:

- Partikelgröße des Substrates: Sie beeinflusst die Dynamik innerhalb des Materials bei Kraftaufladung und führt damit zu unterschiedlicher Steifigkeit, Scherfestigkeit und Dämpfungseigenschaften, hat aber auch Einfluss auf das Wasserbindungsvermögen (Zhang & Baker 1999; Guisasaola et al. 2010). Durch verschieden intensive Nutzung gewisser Bereiche auf Spring- und Dressurplätzen kommt es zu Unterschieden in der Partikelgröße, was wiederum zu variierenden Härtegraden innerhalb des Platzes führt. Dies könnte sich auf das Verletzungsrisiko auswirken (Herholz et al. 2023).
  - Erdbestandteile und Mineralzusammensetzung: Beimengungen wie Ton oder Lehm senken das Elastizitätsmodul von Erde und Sand, machen es also nachgiebiger und weniger steif (Guisasaola et al. 2010). Durch mehr Zusammenhalt der Partikel führen diese Materialien zu besserer Stabilität beim Fuß des Pferdes, ein zu hoher Gehalt kann jedoch zu unerwünschter Klumpenbildung führen (Bridge & Peterson 2006).
  - Wachsgehalt: Bei den modernen sandbasierten Allwetterböden übernimmt Wachs eine ähnliche Funktion wie Ton oder Lehm und beeinflusst Dämpfung und Elastizität (Chateau et al. 2009a). Diese hydrophobe Beschichtung erleichtert zudem die Drainage von Wasser und macht die Böden damit unabhängiger von der Regenmenge (Bridge & Peterson 2006). Allerdings besteht eine Abhängigkeit von der Temperatur, da diese die Eigenschaften von Wachs beeinflusst (Northrop et al. 2020). So sind wachshaltige Böden bei kälteren Temperaturen härter und zeigen erhöhte Scherfestigkeit.
  - Art und Menge an Beimengungen: Zugesezte Holzschnitzel, synthetische Fasern oder Gummipartikel beeinflussen Härte, Elastizität und Scherfestigkeit und verhindern eine zu schnelle Verformung der Bereiche, in denen Pferde in Arenen häufig bewegt werden (Malmgren et al. 1994; Rogers et al. 1998; Rohlf et al. 2023b). Ein höherer Fasergehalt führt beispielsweise zu einem höheren Reibungskoeffizienten, wie Messungen mit Scherfestigkeitstestern zeigen.
  - Art beteiligter Pflanzenarten bei Grasböden: Shearman und Beard (1975), sowie Orchard (2002) und Stiles et al. (2009) zeigten die unterschiedliche Widerstandsfähigkeit und Scherfestigkeit verschiedener Graspflanzen bei sportlicher Nutzung auf.
  - Tiefe der Tretschicht: Tiefere Sandböden, Sandgemische oder Allwetterböden sind weniger hart als flache Tretschichten (Setterbo et al. 2011; Mahaffey et al. 2013), was protektiv für Verletzungen wirkt. Die Fortbewegung auf tiefem Boden geht jedoch sowohl beim Menschen als auch beim Pferd mit einer längeren Stützbeinphase, kürzerer Schrittlänge und erhöhtem Energieaufwand einher (Zamparo et al. 1992; Pinnington & Dawson 2001; Caure et al. 2021), was die Geschwindigkeit negativ beeinflusst. Rohlf et al. (2023b) maßen auf tieferen Tretschichten höhere Scherkräfte. Auf Sandböden zeigen sich im Vergleich zu flachem Asphalt eine höhere und länger dauernde Zugspannung auf der Oberflächlichen Beugesehne, jedoch eine niedrigere Kraftübertragungsrate (Kai et al. 2000; Ravary-Plumiöen et al. 2012).
  - Geometrie und Konstruktion: Im Rennsport spielt das geometrische Design der Rennstrecke, vor allem die Kurvenweite und die Neigung der Strecke, ebenfalls eine Rolle für die Bewegungsmuster, Verletzungsgefahr und Leistung (Fredricson et al. 1975; Oikawa et al. 1994; Self et al. 2012; Rogers et al. 2014; Parkes et al. 2020; Peterson et al. 2021). Dies resultiert aus der asymmetrischen Kraftverteilung bei Bewegung in Kurven (Crevier-Denoix et al. 2017a). Die Mehrzahl der Rennen findet in Richtung gegen den Uhrzeigersinn statt, was zu einer unterschiedlichen Verteilung von Verletzungsmustern und -häufigkeiten der inneren und äußeren Gliedmaßen führt (Peterson et al. 2021). Eine Studie von Evans und Walsh (1997) zeigte, dass eine Erhöhung der Kurvenneigung einer Rennstrecke von 4,8° auf 5,7° zu einer Reduktion der Verletzungsrate um 22 % führte.
- Folgende externe Einflüsse beeinflussen beispielsweise die Bodenmechanik:
- Nutzungsintensität, Alter und Pflege des Bodens: Durch mehr oder weniger intensive Nutzung und Pflegemaßnahmen entstehen in den Arenen Materialverschleiß, Komprimierung, Kontamination mit z.B. Pferdekot, Verflüchtigung synthetischer Bestandteile und Unregelmäßigkeiten in der Beschaffenheit zwischen stark und weniger stark genutzten Zonen. Das Verletzungsrisiko ist auf älteren Böden insgesamt höher (Bridge & Peterson 2006; Murray et al. 2010b; Hobbs et al. 2014). Grasböden müssen regelmäßig gemäht, gedüngt, gewalzt und vertikutiert, sowie der Wassergehalt korrigiert werden (Mooney & Baker 2000; Hoffmann 2020). Bei häufig wiederholtem Krafteinfluss wird die Elastizität der Erde verringert (Guisasaola et al. 2010) und auch innerhalb eines Rennens gibt es bereits messbare Änderungen in z.B. der penetrometrischen Härte (Rogers et al. 2014). Auch bei synthetischen Böden und *Dirt-Tracks* beeinflusst die Dichte die elastischen Eigenschaften, was die Wichtigkeit von regelmäßigem Eggen unterstreicht (Harrison et al. 2022; Rohlf et al. 2023a). Sandböden und Sandgemische müssen nach der Benutzung geglättet und geegett werden, um Unebenheiten zu beseitigen und damit einheitliche elastische Eigenschaften zu bewahren (Peterson & McIlwraith 2008; Blundell 2010; Riggs 2010; Setterbo et al. 2011; Mahaffey et al. 2013; Tranquille et al. 2015). Unebenheiten

sind mit einem höheren Verletzungsrisiko assoziiert (Northrop et al. 2016).

- Feuchtigkeitsgehalt: Outdoor-Plätze sind den Wetterbedingungen deutlich stärker ausgeliefert als Indoor-Plätze, was großen Einfluss auf die Bodeneigenschaften haben kann und ein angepasstes Management erfordert. Die Bodenfeuchtigkeit lässt sich durch Bewässerungs- und Drainagesysteme sowie durch Partikelgröße des Substrates und Beimengung hydrophober Substanzen wie Wachs beeinflussen. Die Feuchtigkeit hat nachweislich Einfluss auf das Elastizitätsmodul, die Steifigkeit, Scherfestigkeit und Dichte von Erde, Gras- und Sandböden (Alexandrou & Earl 1998; Al-Shayea 2001; Li & Qubain 2003; Guisasola et al. 2010; Blanco et al. 2023; Rohlf et al. 2023b). Ebbe-Flut Bewässerungssysteme führten bei Dressur- und Springplätzen zu räumlich und zeitlich konstanten Bodeneigenschaften als Beregnungsanlagen (Herholz et al. 2023). Bei Sandböden mit oder ohne organische Beimengungen führt ein größerer Wassergehalt zu größerer Härte (Ratzlaff et al. 1997; Chateau et al. 2010). So wurden bei einem *Dirt-Racetrack* Härte und Energierückgewinnung mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt (von 8–14 %) größer. Für Sandböden wird ein Feuchtigkeitsoptimum zwischen 8 und 17 % für den Einsatz im Pferdesport angenommen (Ratzlaff et al. 1997). Die Bewässerungsstrategie muss bei staubenden Böden auch an die aktuelle Staubbildung angepasst werden, da Staub Erkrankungen des Respirationstraktes fördert (Claußen & Hessel 2017; Claußen et al. 2019a).
- Temperatur: Die Außentemperatur wirkt sich zeitverzögert auf die Temperatur in verschiedenen Bodenschichten aus, was wiederum den Wassergehalt und die Mechanik zwischen den Bodenpartikeln beeinflusst (Bridge & Peterson 2006; Peterson et al. 2012; Northrop et al. 2020). Höhere Temperatur beeinflusst bei synthetischem Boden besonders den Wachsanteil und führt zu einer verringerten Härte, was mit langsamerem Renntempo der Pferde einhergeht (Peterson et al. 2010; Bridge et al. 2015; Northrop et al. 2020). Gefriert der Boden, wird die Härte deutlich erhöht, wobei ein größerer Wassergehalt diesen Effekt vergrößert (Zebarth et al. 1984).
- Weitere Wetterbedingungen: Insgesamt zeigt sich eine Abhängigkeit der Bodeneigenschaften von den Jahreszeiten (Firth et al. 2005; Rogers et al. 2014). Grace und Russel (1977) zeigten einen Effekt von Wind auf Grasböden und deren Wasserbindungsvermögen. Auch Lichteinflüsse beeinflussen die Grasqualität auf sportlich genutzten Grasflächen (van Huylenbroek & van Bockstaele 2001), sowie die Haltbarkeit von synthetischen Böden (Bridge et al. 2022).

## Einflüsse des Pferdes

Die wirkenden Kräfte hängen genauso von Eigenschaften der mit dem Boden kollidierenden Gliedmaße ab. Eine Rolle spielen z.B. die Sportdisziplin mit jeweils verschiedenen Bewegungsrichtungen, Gangarten und Geschwindigkeiten des Pferdes (Ratzlaff et al. 1997; Burn & Usmar 2005; Hobbs et al. 2011; Orlande et al. 2012), Körperhaltung (Waldern et al. 2009), Trainingszustand (Santamaría et al. 2004; Butcher et al. 2007; Becker & Lewczuk 2022), Gewicht (Clayton & Hobbs 2019), anatomische Einflüsse (Cust et al. 2013; Colborne et al. 2016), Hufbeschlagn (Roepstorff et al. 1999; Johnston & Back 2006; Murphy 2009; Back & Pille 2013) und Hufhornfeuchtigkeit (Hinterhofer et al. 1998).

Mittels Hufbearbeitung und Beschlagn hat man besonders großen Einfluss auf die Interaktion zwischen Gliedmaße und Boden. Es können die Dämpfungseigenschaften und der Reibungswiderstand beeinflusst werden und damit die Effektivität des Pferdes beim Abstoß nach vorne. Durch Beschlagn mit konventionellen Eisen werden die vertikale Maximalkraft bei der Fußung sowie die vertikale Bremsbeschleunigung beim Auf Fußen erhöht (Roepstorff et al. 1999; Horan et al. 2022). Dies wird auf mehrere Faktoren zurückgeführt: Der Vorführbogen wird durch das erhöhte Gewicht raumgreifender (Willemen et al. 1997), was mit einer Beschleunigung und erhöhten Aufprallgeschwindigkeit des beschlagenen Hufes auf den Boden einhergeht. Die Materialsteifigkeit und die Härte des Eisens sind im Vergleich zum Hufhorn größer. Außerdem findet je nach Bodenmaterial eine geringere und/oder verzögerte Lastaufnahme von Strahl und Sohle des Hufes im Vergleich zum unbeschlagenen Huf statt. Manche Plastikeisen und Gummieinlagen verringern dagegen die maximale Bremsbeschleunigung und Vibration beim Aufprall des Hufes aufgrund ihrer Dämpfungseigenschaften (Benoit et al. 1993). Daher könnten solche Einlagen eine protektive Wirkung bei Krankheiten wie Osteoarthrose haben. Nach Vos und Riemersma (2006) haben unbeschlagene Hufe auf sehr harten Oberflächen wie Stein und Asphalt mehr *Grip* (Bodenhaftung), beschlagene Hufe allerdings auf Gummimatten. Auch die Spannung auf Sehnen kann durch Hufbearbeitung und -beschlagn beeinflusst werden (Riemersma et al. 1996). So kann z.B. der Zug auf der Tiefen Beugesehne durch Erhöhung der Trachten verringert werden (Lawson et al. 2007). Stollen oder *Toe Grips/Grabs* an der Unterseite des Beschlagns werden häufig eingesetzt, um horizontales Rutschen einzuschränken und das Abstoßen vom Boden nach vorne zu effektivieren (Harvey et al. 2012). Dies macht man sich beispielsweise auf Grasböden im Spring- und Vielseitigkeitssport zunutze, auf denen die Pferde schnelle Bewegungen und Richtungswechsel absolvieren müssen, oder im Rennsport, um die Geschwindigkeit zu erhöhen. Die Verwendung einer solchen Ausrüstung kann aber auch zu erhöhten internen

Scherkräften auf Gelenke und andere Strukturen der Gliedmaße führen, was das Verletzungsrisiko erhöht (Kane et al. 1996; Pratt 1997; Hill et al. 2001). Hufbeschlag wirkt sich außerdem auf weitere kinematische Aspekte wie die Landephase (Hagen et al. 2023), die *Breakover* Phase (Stutz et al. 2018; Hagen et al. 2021; Horan et al. 2022), die *Range of Motion* und die Gelenkwinkel (Caure et al. 2018) aus. Auch die Druckverteilung im Huf, der Hufmechanismus und die Position des Hufes in der Tretschicht werden durch den Beschlag in Zusammenhang mit dem verwendeten Bodenmaterial beeinflusst (Dahl et al. 2016; Hagen et al. 2017; Reilly et al. 2023). Horan et al. (2021c) zeigten, dass sogar der Schwerpunkt von Rennpferd und Jockey durch Hufbeschlag beeinflusst wird, was sich auf die Körperstabilität und damit die Sicherheit auswirken kann.

## Objektive Messverfahren für Bodeneigenschaften

Mit objektiven Messverfahren sollen Bodeneigenschaften möglichst genau und standardisiert erhoben werden. Die Böden sollen vergleichbar gemacht und der Einfluss interner und externer Faktoren gezeigt und quantifiziert werden. Außerdem können Bodeneigenschaften mit Leistung und Pathologien der Pferde assoziiert und die zugrundeliegenden Mechanismen untersucht werden. Die Vielfalt an bisher entwickelten Geräten spiegelt die verschiedenen wissenschaftlichen Herangehensweisen und Ansätze, aber auch die Komplexität des Themas wider.

Neben den mechanischen Testapparaten gibt es auch viele andere Verfahren, die unverzichtbare Informationen über die Böden selbst oder externe Einflüsse liefern, die für die Interpretation der Daten wichtig sind. Auf diese wird später im Artikel eingegangen.

Die Testapparate und Messverfahren für mechanische Bodeneigenschaften lassen sich anhand verschiedener Prinzipien kategorisieren:

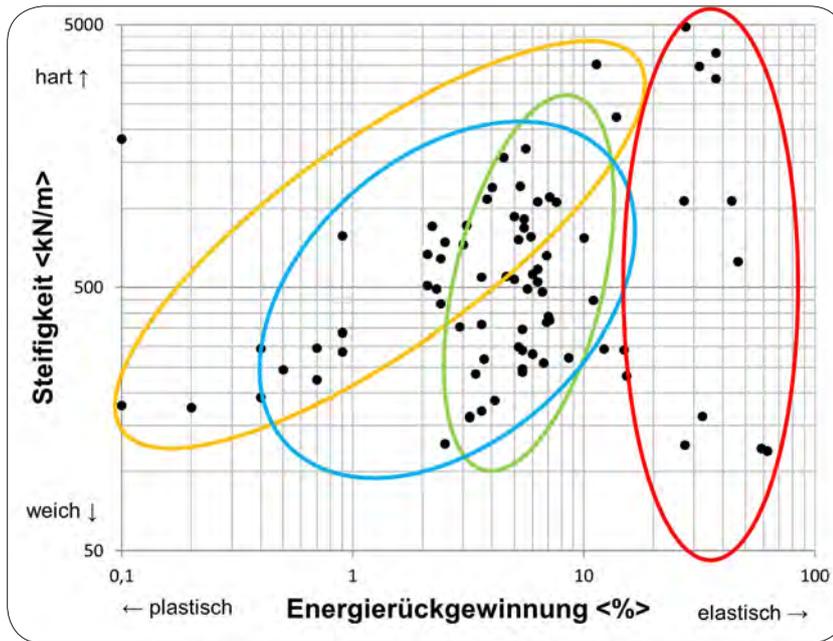
### 1. Messapparate mit dem Ziel, Bodeneigenschaften möglichst einfach und standardisiert zu messen

Der Vorteil dieser Geräte (z.B. Fallkörper mit Sensoren oder Penetrometer) ist die schnelle, einfache, wenig fehleranfällige und kostengünstige Anwendung. Messungen können ohne größeren Aufwand auch in kurzen Abständen erfolgen, um z.B. Wettereinflüsse täglich zu vergleichen, oder ein Monitoring über einen längeren Zeitraum durchzuführen. Die Geräte können einfach transportiert werden und damit mit dem gleichen Gerät mehrere Orte im gleichen Zeitraum analysiert werden. Auch für Laien, z.B. die Besitzer von Reitanlagen, sind sie oft geeignet, um selbstständig eine Qualitätskontrolle der Böden durchzuführen (Blanco et al. 2021). Für die Forschung ist die hohe Vergleichbarkeit der Messungen von Vorteil. Die direkte

Aussagekraft ihrer Daten hinsichtlich der Wirkung der Böden auf das Pferd ist allerdings beschränkt, da der Messvorgang nicht die tatsächlich durch ein Pferd ausgeübten Kräfte und Bewegungsmuster widerspiegelt (Kruse et al. 2013; Munoz-Nates et al. 2017). Manche Bodeneigenschaften, z.B. der Effekt tiefer gelegener Bodenschichten, kommen erst beim Wirken größerer Kräfte zum Tragen (Thomason & Peterson 2008; Munoz-Nates et al. 2017) und können von diesen Geräten oft nicht erfasst werden. Für eine weiter reichende Interpretation ist die Kombination mit anderen Daten und Messverfahren daher sinnvoll. Eine Möglichkeit ist z.B., einen Bezug zu Verletzungsraten auf den untersuchten Böden herzustellen. Diese multifaktoriell beeinflussten Daten müssen jedoch über einen langen Zeitraum gesammelt werden, während Bodeneigenschaften z.B. durch Wettereinflüsse schnell variieren. Einzelnen Eigenschaften gewisse Risiken zuzuordnen wird dadurch erschwert. Andere Möglichkeiten, um Rückschlüsse auf die Wirkung auf Athleten zu ziehen, sind Kombinationen mit *in vivo*- und *in vitro*-Untersuchungen (Lanovaz et al. 1998), die zeigen, wie sich Kräfte direkt auf Pathologien und Strukturen des Bewegungsapparates auswirken. So sind z.B. Kräfte und assoziierte Eigenschaften wie Kraftübertragungsraten oder Frequenz der Krafteinwirkung bekannt, die zur Entstehung von Knochen- und Gelenkerkrankungen bei Pferden oder Versuchsspezies führen (Radin et al. 1972; Serink et al. 1977; Dekel & Weissman 1978; Evans et al. 1992; Orlande et al. 2012; Singer et al. 2013; Malekipour et al. 2016, 2018; Shaktivesh et al. 2020). Weitere *in vivo*-Untersuchungen, wie z.B. Messungen der Zugspannung auf Sehnen bei verschiedenen Böden (Pourcelot et al. 2005), wären interessant, um sie mit objektiv gemessenen Bodeneigenschaften in Verbindung zu bringen. Diesbezüglich gibt es noch ein großes Forschungspotential.

Zu den Messapparaten des einfachen, möglichst standardisierten Prinzips zählen z.B.:

- Clegg-Hämmer (Clegg 1976) und funktionsähnliche Geräte: Ein Fallkörper mit definierter Masse wird aus einer stets gleichen oder variablen Höhe auf die zu testende Oberfläche fallen gelassen. Mit Hilfe von Beschleunigungssensoren (Accelerometern) können Beschleunigung bzw. Bremsbeschleunigung und deren zeitliches Auftreten, sowie Amplitude und natürliche Frequenz beim Abprall des Körpers von der Oberfläche (Vibrationen) gemessen werden. Weitere Parameter wie beispielsweise die Härte, Steifigkeit, Aufprallgeschwindigkeit, Eindringtiefe in den Boden, Kraftreduktion, Elastizitätsmodul und Energierückgewinnung können errechnet werden (siehe Abb. 1).  
Nach dem ersten Modell von Clegg, ursprünglich zur Untergrund-Testung für die Konstruktion von Gehsteigen entwickelt, sind einige Apparate gezielt



**Abb. 1:** Charakterisierung verschiedener Böden mit Hilfe von accelerometrischen Messungen mit einem 6,15 kg schweren Fallkörper (Vienna Surface Tester) bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 4 m/s. Gelbe Ellipse: Werte für Sandböden; blaue Ellipse: Werte für Sand-Fasergemische; grüne Ellipse: Werte für Grasböden; rote Ellipse: Werte für Gummiböden / Characterization of different surfaces using accelerometric measurements with a 6.15 kg drop body (Vienna Surface Tester) at an impact velocity of 4 m/s. Yellow ellipse: values for sand surfaces; blue ellipse: values for sand-fibre mixtures; green ellipse: values for grass surfaces; red ellipse: values for rubber surfaces



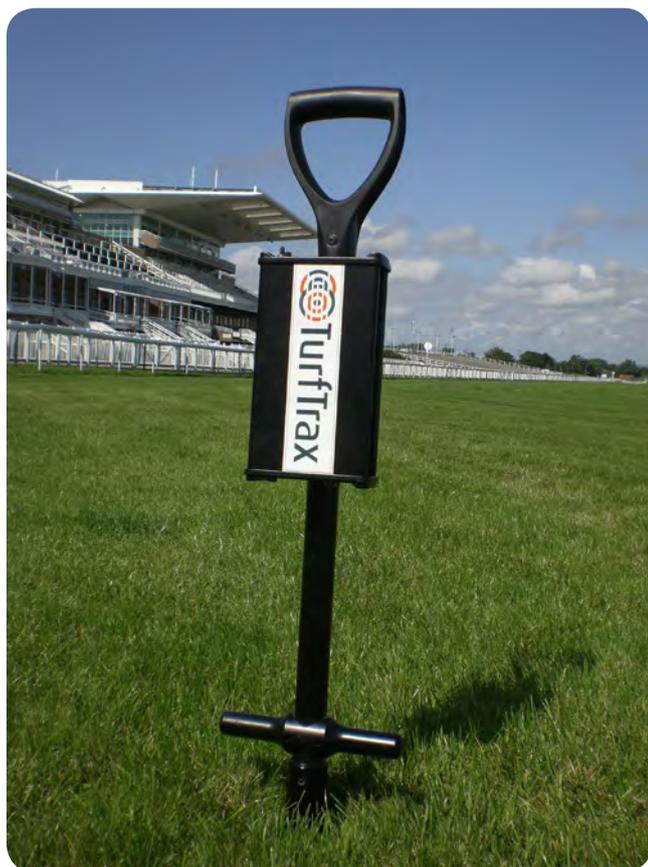
**Abb. 2:** Vienna Surface Tester (Mit freundlicher Genehmigung von Karina Weimar) / Vienna Surface Tester (Courtesy of Karina Weimar)

zur Analyse von Sportböden und Reitsportböden entwickelt worden. Dazu gehören z.B. die Apparate von Drevemo et al. (1994), Dixon und McWilliams (1998), Pringle (2007) oder der „Artificial Athlete“ (German Institute for Standardization 2005; Kruse et al. 2013), der mit einer Feder zur Dämpfung des Aufpralls modifiziert wurde. Ein vergleichbares Modell wird aktuell auch von der Fédération Internationale de Football Association (FIFA) zur Testung der Fußballplätze eingesetzt (Benetti 2022a). Oikawa et al. entwickelten 2000 ein an einem Fahrzeug befestigtes Modell, um großflächige Testungen vorzunehmen. Modern und kommerziell erhältlich sind z.B. der FieldTester, der Clegg Impact Tester® und auch der Vienna Surface Tester. Dieses 2015 in Wien entwickelte und später modifizierte Modell von Peham und Schramel (2015) stellt mit zwei Accelerometern eine Weiterentwicklung dieser Systeme dar (siehe Abb. 2).

Der kugelförmige Fallkörper kann aus verschiedenen Höhen sehr einfach mit Hilfe einer Auslösevorrichtung fallen gelassen werden. Damit können die elastischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit und verschiedenen Kräften gemessen und dargestellt werden. Die Messergebnisse zeigen hervorragende Wiederholbarkeit und Unabhängigkeit vom Anwender (Weimar et al. 2022). Apparate mit Fallkörpern höheren Gewichtes, um den Kräften eines Pferdehufes

bei der Fußung gerecht zu werden, wurden von Ratzlaff et al. (1997) und Setterbo et al. (2011) entwickelt und angewendet. Auch dynamische Plattendruckgeräte werden eingesetzt, wie z.B. ein modifiziertes Modell, welches mit den Kräften eines galoppierenden Pferdes arbeitet. Herholz et al. (2023) untersuchten damit Spring- und Dressurplätze.

- Dynamische Penetrometer: Im Gegensatz zu den stumpfen, abprallenden Fallkörpern der Clegg Hämmer penetrieren diese Geräte das Bodenmaterial. Anhand der hierfür nötigen Kraft, des Widerstands des Bodens oder der möglichen Eindringtiefe kann der Härtegrad eines Bodens bestimmt werden (Miki 1960; Thomas et al. 1996; Mohammadi et al. 2008; Kim et al. 2021). Voraussetzung ist, dass das Bodenmaterial bis zur nötigen Eindringtiefe homogen beschaffen ist. Der 2002 von TurfTrax und der Cranfield University entwickelte GoingStick® ist ein weiterentwickeltes, populäres Penetrometer, das vor allem im Rennsport genutzt wird (Dufour & Mumford 2007, siehe Abb. 3), aber auch für Rasenflächen anderer Sportarten kalibrierbar ist (Caple et al. 2013). Vor der Etablierung des GoingSticks® wurde der Härtegrad britischer Rennbahnen subjektiv durch das manuelle Eindrücken von Spazierstöcken in den Boden bestimmt, wobei diese Einschätzungen positiv mit dem Auftreten von Verletzungen



**Abb. 3:** GoingStick® (Mit freundlicher Genehmigung von TurfTrax Ltd) / GoingStick® (Courtesy of TurfTrax Ltd)

korrelierten (Williams et al. 2001; Parkin et al. 2004a,b; Oikawa & Kusunose 2005; Boden et al. 2007). Der GoingStick® hilft, diese Einschätzungen zu objektivieren. Mit einem zweiachsigen Kraftmesser misst er die Kraft, die nötig ist, um ein Metallblatt in die Oberfläche einzubringen. Im weiteren Messvorgang wird der GoingStick® in einem Winkel von 45° zum Boden gedrückt, wobei anhand der dazu nötigen Kraft die Scherfestigkeit des Bodens gemessen wird. Die Messdaten sind nicht gänzlich unabhängig vom Anwender, da die gemessenen Kräfte je nach Geschwindigkeit des Einbringens in den Boden variieren können.

- Messgeräte für die Scherfestigkeit oder Traktion: Die Scherfestigkeit spielt sowohl für die Sicherheit (Pratt 1997; Vos & Riemersma 2006; Parkes & Witte 2015), als auch für die Leistung der Pferde eine große Rolle (Peterson et al. 2012). Bei zu niedriger Scherfestigkeit rutscht das Pferd, und die Hufe werden beim Abstoß der Gliedmaße nach vorne nicht ausreichend unterstützt. Bei zu hoher Scherfestigkeit werden die Bremskräfte auf den Bewegungsapparat sehr groß, was zu erhöhten Schermomenten innerhalb der Gliedmaße, v.a. in den Gelenken, führt (Robin et al. 2009; Chateau et al. 2010). Die Apparate funktionieren, indem ein Körper auf den Boden aufgebracht wird und

ihn teilweise penetriert. Dann werden die Kräfte gemessen, die nötig sind, den Körper horizontal (longitudinal oder rotierend) zu bewegen. Modelle zur Messung *in situ* sind z.B. der Pennfoot von McNitt et al. (1997), der Turf-Tec Shear Strength Tester®, der Turf Shear Tester® oder die Torque Wrench der FIFA (Benetti 2022b). Das Modell Glen Whity Torque Tester von Lewis et al. (2015) zur Messung rotierender Scherfestigkeit wurde mit Messungen eines kombinierten Bodentesters (Orono Biomechanical Surface Tester, siehe unten) verglichen. Trotz schwacher linearer Korrelation der Ergebnisse beider Testapparate war nur der Glen Whity Torque Tester in der Lage, signifikante Unterschiede zwischen den zwei untersuchten Oberflächen nachzuweisen. Die Scherfestigkeit kann auch im Triaxialversuch im Labor bestimmt werden (American Society for Testing and Materials International 15.01.2011). Ein *in vitro* Versuchsaufbau von Vos und Riemersma (2006) erlaubte die Bestimmung des Friktionskoeffizienten zwischen Pferdehuf mit und ohne Beschlag auf verschiedenen Oberflächen. Mit einem tragbaren, digitalen Kraftmesser und einer Kraftmessplatte gelang jeweils die Messung der Friktion beim horizontalen Bewegen des Hufes über die Oberfläche. In einer Studie von Claußen et al. (2019b) waren mit einem rotierenden *traction tester* verschiedene Scherfestigkeiten bei unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten des Bodens, Pflegemaßnahmen, sowie der Einsatz von Stollen messbar, jedoch ohne signifikanten Unterschied zwischen einem Sandboden und einem Sand-Fasergemisch. Scherfestigkeitstester können außerdem genutzt werden, um die Scherparameter verschiedener Hufbeschläge auf Oberflächen zu untersuchen, indem man den Beschlag an der Kontaktfläche des Testers mit dem Boden anbringt (Mahaffey et al. 2016).

## 2. Messapparate, die versuchen, der mechanischen Interaktion des Pferdes mit dem Boden möglichst gerecht zu werden

Diese Apparate arbeiten mit Kräften im Ausmaß der tatsächlich wirkenden Kraft eines Pferdes in Bewegung und werden auch weiteren mechanischen Aspekten der natürlichen Fußung gerecht. Dennoch kann eine naturgetreue Simulation nicht exakt bewerkstelligt werden. Die Messergebnisse sind mehrdimensional und liefern realistischere Informationen über die Einflüsse, die das Pferd in Bewegung erfährt. Der Nachteil dieser Geräte besteht darin, dass sie durch die aufwändigere Gestaltung weniger mobil, meist kostenintensiver und in der Anwendung geschultem Personal vorbehalten sind. Breit angelegte Versuche zur Sammlung großer Datenmengen sind mit größerem Aufwand verbunden. Zudem werden die gemessenen Einzelwerte bei



**Abb. 4:** Orono Biomechanical Surface Tester im Einsatz (Mit freundlicher Genehmigung von Michael Peterson) / Orono Biomechanical Surface Tester in action (Courtesy of Michael Peterson)

komplexeren Messverfahren von mehreren Faktoren beeinflusst, was deren Genauigkeit kompromittieren kann und sich in höheren Variationskoeffizienten zeigt (Peterson et al. 2008). Ergänzende Messungen zur Interpretation der gewonnenen Daten sind wie auch bei den oben beschriebenen Geräten sinnvoll.

Zu diesen Geräten gehören z.B.:

- Der Orono Biomechanical Surface Tester (OBST, Peterson et al. 2008): Mit diesem Gerät, dessen Fallkörper die Hufform und deren Winkelung zum Boden bei der Fußung berücksichtigt (siehe Abb. 4), soll die Mechanik des inneren Vorderbeines im Galopp beim Aufprall und in der frühen Stützbeinphase simuliert werden. Auf dieses Bein wirken in dieser Phase Kräfte bis etwa des doppelten Körpergewichtes des Pferdes (Self Davies et al. 2019). Diese Phase des Bewegungszyklus ist kritisch für die Entstehung von muskuloskelettalen Verletzungen (Pratt 1997; Thomason & Peterson 2008). Nach dem Aufprall des Fallkörpers wird über eine Gasfeder zusätzlich Kraft übertragen. Neben vertikaler Kraft- und Beschleunigungsmessung finden auch Messungen in der Horizontalebene statt, da der Fallkörper durch

den gewinkelten Aufprall zum Boden auch horizontal gleiten und in den Boden eindringen kann. Bis jetzt gibt es keine wissenschaftlichen Vergleiche zur Aussagekraft über Verletzungsrisiken der gemessenen Böden, es ist aber anzunehmen, dass mit Hilfe der OBST-Messungen eine gewisse Vorhersage über das Verletzungsrisiko und mögliche Performance der Pferde getroffen werden kann. Auch zur Überprüfung von Pflegemaßnahmen und der Eigenschaften neuartiger Arenen hat er sich bewährt (Tranquille et al. 2015; Northrop et al. 2022).

- Track-Testing Device von Setterbo et al. (2011): Dieses Gerät ahmt die Masse, Kontaktfläche, Aufprallgeschwindigkeit und Winkelung des Hufes eines Vollblutpferdes in schnellem Trab oder langsamem Galopp nach. Während somit die reale Kraft imitiert wird, ist durch die kürzere Aufpralldauer die Rate der Kraftübertragung größer als die eines Pferdes. Gemessen werden vertikale Kraft, dreidimensionale Beschleunigung bzw. Abbremsung und vertikale Position. Die Scherfestigkeit kann mit diesem Gerät nicht gemessen werden.
- Turf Testing Rig (Blackburn et al. 2005): Dieses Modell simuliert die sportliche Nutzung durch einen Menschen und misst ebenfalls viele Parameter mittels vertikaler, horizontaler und rotierender Komponente.

### 3. Messungen mit Sensoren am lebenden, bewegten Pferd, um die Interaktion zwischen Pferd und Boden sowie die Auswirkungen auf die Pferdegliedmaße direkt zu messen

Diese Messmethoden sind unverzichtbar, um die reale Interaktion zwischen Boden und Pferdekörper zu verstehen und auf die Entstehung von Pathologien rückschließen zu können (Kai et al. 1999; Crevier-Denoix et al. 2013a). Außerdem können verschiedene Böden bei natürlichem Krafteinfluss durch die Pferde verglichen werden (Roland et al. 2005). Jedoch sind diese Daten jeweils auf eines oder wenige instrumentalisierte Pferde bezogen und hängen von deren Gewicht, individuellen Bewegungsmustern oder Trainingszustand (Becker & Lewczuk 2022) ab. Studien mit einer großen Anzahl instrumentalisierter Pferde sind aufgrund des hohen Aufwandes schwer durchführbar, genauso wie Langzeitstudien oder vergleichende Studien vieler Böden unter den gleichen Umständen. Die Untersuchungen liefern meist nur direkte Informationen über einzelne Strukturen der Gliedmaße, beispielsweise bei Messinstrumenten an der Hornkapsel des Hufes. Invasive Untersuchungen wie z.B. durch Dyhre-Poulsen et al. (1994) oder Lanovaz et al. (1998), die die Dämpfung und Kraft bis zum Fesselbein mit invasiv eingebrachten Sensoren messen, liefern Einblicke in die Kraftübertragung innerhalb der Pferdegliedmaße, eignen sich aber wiederum nicht für die standardmäßige und großflächige

Bodenuntersuchung. Simultane Messungen von Kraft, Beschleunigung und kinematischer Daten (Gustås et al. 2001), oder szintigrafische Untersuchungen ganzer Pferdegliedmaßen nach Training auf verschiedenen Böden (Dimock et al. 2013) sind möglich, um Auswirkungen auf den Pferdekörper im Gesamtzusammenhang zu verstehen.

Eingesetzte Messmethoden zur Messung der *in vivo*-Interaktion zwischen Boden und Pferdebein sind z.B.:

- Beschleunigungssensoren (Accelerometer) am Pferdehuf: Durch deren Anbringen an der äußeren Hornwand (z.B. Chateau et al. 2010) oder zwischen Huf und Hufeisen (Kai et al. 2000) lassen sich die vertikalen oder auch dreidimensionalen Beschleunigungen sowie die entstehenden Vibrationen bei der Fußung messen. Kruse et al. (2012) zeigten eine positive Korrelation zwischen den gemessenen Beschleunigungswerten von Huf und Fesselgelenk.
- Kraftmessung zwischen Hufsohle und Oberfläche: Zwischen Huf und Beschlag oder Huf und Boden angebrachte Kraftmesszellen können die vertikale Bodenreaktionskraft im Laufe der Stützbeinphase, sowie die Kraftreduktion verschiedener Böden messen (z.B. Ratzlaff et al. 1997; Kai et al. 2000). Eine weiterentwickelte Ausführung sind dynamometrische Hufschuhe, die in der Lage sind, dreidimensionale Bodenreaktionskräfte zu messen (z.B. Chateau et al. 2009b).
- Kraft- oder Druckmessplatten: Sie sind in der Regel an den Einsatz im Labor gebunden und werden überwiegend in der Bewegungsanalyseforschung verwendet (Schamhardt & Merckens 1987; Oosterlinck et al. 2010). Auch kraftmessende Laufbänder sind im Einsatz (Belli et al. 2001; Weishaupt et al. 2002). Die Untersuchung von Bodeneigenschaften mit diesen Methoden unterliegt einigen limitierenden Faktoren, wie aufwändige Installation und der Notwendigkeit von wiederholten Messdurchläufen, bis die Platten von jeweils nur einer Gliedmaße betreten werden. Das zu messende Bodensubstrat muss zudem in einer gewissen Dicke, die als Tretschicht sinnvoll wäre, auf die Messplatte aufgetragen werden. Jedoch kann bei größerer Tiefe die Druckverteilung im Boden diffus sein (Thomason & Peterson 2008). Self Davies et al. (2019) untersuchten erfolgreich die Bodenreaktionskräfte gerittener, galoppierender Rennpferde auf Kraftmessplatten, die in eine Rennstrecke eingebaut worden waren. Dabei waren die Platten von einer 10 cm hohen Sandschicht bedeckt und die gemessenen Bodenreaktionskräfte waren vergleichbar mit erwarteten Werten aus Berechnungen (Witte et al. 2004). Einen Vergleich zweier Bodenmaterialien mittels Druckmessplatten führten Oosterlinck et al. (2014)

unter Laborbedingungen durch. Die Kräfte bei der Fußung und die Druckverteilungen im Huf unterschieden sich zwischen Gummimatten und 5 cm hohem Sand.

- Kinematische Methoden: Mit Hilfe von Kameraaufzeichnungen und am Pferd angebrachten Markern oder optischen Sensoren (Gündemir et al. 2021) kann das Bewegungsmuster der Gliedmaßen gemessen werden. Ausgewertet werden z.B. die Positionierung und Aufprallgeschwindigkeit der Gliedmaßen, der Winkel der Gelenke, das Rutschen nach der Fußung und deren jeweiliges zeitliches Eintreten. Beim genauen Messen feiner Bewegungen, wie z.B. dem Rutschen des Hufes bei Bodenkontakt, zeigte sich die kinematische Methode im direkten Vergleich zur accelerometrischen Messung in Studien etwas ungenauer und fehleranfälliger (Schamhardt & Merckens 1994; Holden-Douilly et al. 2013). Studien mit Vergleichen verschiedener Böden liegen von z.B. Burn und Usmar (2005), Setterbo et al. (2008), Orlande et al. (2012), Walker und Tranquille (2012), Crevier-Denoix et al. (2013b), Northrop et al. (2013), Mendez-Angulo et al. (2014), sowie am aktuellsten von Horan et al. (2021a) vor.
- Messung von Sehnen- und Bänderspannung: Nachdem bereits invasive Methoden zur Spannungsmessung der verschiedenen Sehnen- und Bandstrukturen (Riemersma et al. 1996; Ravary et al. 2004), sowie Computermodelle (Meershoek et al. 2001; Rollot et al. 2004) entwickelt worden waren, etablierten Pourcelot et al. (2005) eine ultraschallbasierte, nicht invasive Methode, um *in vivo* die Kräfte von Sehnen zu messen. Sie basiert auf der Analyse der reflektierten Schallgeschwindigkeit, die von der Spannung der Sehne abhängt. Damit untersuchten Crevier-Denoix et al. (2008, 2009a, 2013c) und Ravary-Plumiöen et al. (2012) die Auswirkung verschiedener Böden auf die Spannung der oberflächlichen Beugesehne. Die Methode könnte in Zukunft wichtige Informationen über das Verletzungsrisiko von Weichteilstrukturen auf verschiedenen Böden liefern.

Weitere Mess- und Labormethoden können die Messungen mechanischer Eigenschaften sinnvoll ergänzen. Während für einige Untersuchungen spezielle Geräte und Labors nötig sind, können manche Tests auch von Laien vor Ort durchgeführt werden. Dazu gehören:

- Tiefen- und Schichtmessung: Mittels Ground Penetrating Radar (z.B. UtilityScan®) oder mechanisch penetrierenden Instrumenten (Oikawa et al. 2000) zur Tiefen- und Schichtenmessung werden Unebenheiten in der Dicke der Tretschicht oder noch tiefer gelegener Schichten aufgezeigt. So können gezielte Korrekturen vorgenommen und damit

- das Verletzungsrisiko gesenkt werden (Mahaffey et al. 2013).
- Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur: Der Wassergehalt im Boden kann z.B. mittels Trocknung in Ofen oder Mikrowelle oder mit in den Boden einbringbaren Messsonden mittels Time Domain Reflectometry (McGill et al. 2022) oder Frequency Domain Reflectometry (Rosenkranz et al. 2013) bestimmt werden. Die Lufttemperatur beeinflusst die Bodentemperatur verzögert, wobei die Oberflächentemperatur mit z.B. Infrarot-Thermometern gemessen werden kann, der tieferen Bodenschichten mit Messsonden. Hierfür sind anwenderfreundliche, kommerzielle Produkte auf dem Markt.
  - Wasserpermeabilität: Infiltrimeter, z.B. das IN2-W-Turf-Tec Infiltrimeter, messen, wie viel Wasser in welcher Zeit durch den Boden dringt.
  - Laboranalyse des Substrates: Zahlreiche Parameter wie Partikelgröße, Zusammensetzung, Gehalt organischer und anorganischer Stoffe und viele weitere können in Labors, wie z.B. dem Racing Surfaces Testing Laboratory in Lexington (USA) gemessen werden. Für synthetische Böden können Kalorimetrie, Thermogravimetrie, Gaschromatografie, Infrarotspektroskopie, Rheologie, Röntgendiffraktometrie und mikroskopische Untersuchungen zur Überprüfung von Einflüssen auf das Bodensubstrat herangezogen werden (Bridges et al. 2023).
  - Botanische Zusammensetzung bei Grasböden: Eine Analyse wird von verschiedenen Labors oder botanischen Instituten angeboten.

Nicht zuletzt sind die Sammlung epidemiologischer Daten, wie z.B. der Equine Injury Data Base (The Jockey Club 2022) oder *post mortem* Untersuchungen (Stover & Murray 2008) von großer Wichtigkeit, um die Inzidenz von Verletzungen auf verschiedenen Böden zu untersuchen. Auch Umfragen unter Reitern über die Einschätzung der Eigenschaften verschiedener Böden wurden in der Wissenschaft verwendet (Horan et al. 2021b; McGill et al. 2021) und mit objektiv gemessenen Daten verglichen (van der Heijden et al. 2018; Egenvall et al. 2021), zeigten jedoch nicht bei allen Messparametern eine positive Korrelation. Die Varianz unter den Meinungen der Reiter ist zudem groß (Hernlund et al. 2017).

Ein weiterer Zugang sind Computermodelle (z.B. Reiser et al. 2000; Symons et al. 2015, 2016a,b, 2017; Harrison et al. 2022; Pagliara et al. 2022), die helfen, Bodeneigenschaften in Reaktion mit modellierten Pferdegliedmaßen zu verstehen. Sie können dazu beitragen, Bodenmaterial zu identifizieren und herzustellen, welches die Gliedmaße optimal unterstützt und das Verletzungsrisiko minimiert. Auch Finite Element Modelle können die Verformung und Belastung von Hufen unter verschiedenen Einflüssen modellieren und vorhersagen (Thomason et al. 2002; Salo et al. 2010). Nicht zuletzt verspricht künstliche Intelligenz

einen alternativen Zugang zum biomechanischen Erkenntnisgewinn (Mouloodi et al. 2021).

### **Überblick über bisher bekannte Eigenschaften verschiedener Reitböden und deren Einfluss auf den Bewegungsapparat des Pferdes**

So vielfältig die Messmethoden für die Bodeneigenschaften sind, so vielfältig sind auch deren Messergebnisse und die daraus möglichen Rückschlüsse. Mit fortschreitendem Wissen über Eigenschaften, die Risiken minimieren und Leistung fördern, können Böden nicht nur für verschiedene Zielsportarten optimiert werden, sondern auch neue Technologien und Materialien geschaffen werden (z.B. Rose-Harvey et al. 2012; Crevier-Denoix et al. 2015; Schnabel 2018; Blanco et al. 2023). Zudem kann ein optimales Nutzungs-, Management- und Pflegesystem für die Böden etabliert werden (Setterbo et al. 2011; Mathew et al. 2016). Auch die Ausrüstung des Pferdes, vor allem der Hufbeschlag, kann nach wissenschaftlicher Erkenntnis für den jeweiligen Boden optimiert werden (Roepstorff et al. 1999; Murphy 2009; Back & Pille 2013).

Der Fokus der wissenschaftlichen Untersuchung liegt seither bei den Einflüssen auf den Bewegungsapparat, jedoch wirkt sich die Art des Bodensubstrates natürlich auch auf andere Körpersysteme wie den Respirationstrakt aus (Claußen et al. 2019a). Auch Einflüsse der Bodenart, -härte und -feuchtigkeit auf Stoffwechselforgänge sind bekannt (Davie & Evans 2000; Nagy et al. 2014; Bogossian et al. 2021; Wang et al. 2023).

Der Einfluss des Bodensubstrates auf die Gliedmaße und den Bewegungsapparat beginnt bei der Interaktion des Hufes mit der Oberfläche, der daraus resultierenden Druckverteilung auf die Hufsohle und der Orientierung der Position des Hufes zur Oberfläche (Hüppler et al. 2015; Singer et al. 2015). Anschließend setzen sich die Einflüsse des Bodens komplex auf die Gliedmaße und auch den Rumpf nach proximal fort. Verschiedene Forschungsansätze zeigen Details dieser Krafteinflüsse, während andere die Folgen, wie z.B. Verletzungsraten betrachten.

Im Rennsport gibt es besonders viele Untersuchungen, da Leistung, Verletzungsrate und Karrieredauer der Pferde in besonderem Ausmaß vom Boden beeinflusst werden (Maeda et al. 2012; Özen et al. 2021; The Jockey Club 2022). Oft haben Verletzungen während der Rennen fatale Folgen für das Tier, und der Rennsport wird aufgrund der Tierschutzrelevanz öffentlich diskutiert (Heleski et al. 2020; Mactaggart et al. 2021). Eingesetzte Böden sind überwiegend Grasböden, *Dirt-Tracks*, Sandgemische oder synthetische Böden (Morrice-West et al. 2018). Grasböden sind im Vereinigten Königreich und Europa die überwiegend verwendete Oberfläche (Rosanowski et al. 2017a,b), kommen aber überall auf der Welt zum

Einsatz. Sogenannte *Dirt-Tracks* sind Sandböden mit Lehm- oder Tonbeimengung und sind in Nordamerika die traditionell meistgenutzten Böden für Pferderennen. Seit einigen Jahren werden nun immer mehr synthetische Böden eingesetzt, die je nach Hersteller aus verschiedenen Inhalten zusammengesetzt sein können. Zur Basis aus Sand werden diesen *All Weather Wax Tracks* z.B. Kunstfasern aus Teppichen, Nylon oder Gummipartikel hinzugefügt und das Gemisch mit einer wasserabweisenden Wachsschicht überzogen (z.B. Polytrack®, Tapeta®, Cushion Track und Fibrasand®). Selten kommen im Rennsport Holzfaserböden (Moyer et al. 1991; Drevemo & Hjertén 1991) oder reine Sandböden (Miki 1960) zum Einsatz. Je nach Hersteller und lokaler Verfügbarkeit werden bei künstlich errichteten Böden andere Rohstoffe verwendet. Dies, sowie weitere Einflüsse wie Temperatur oder Feuchtigkeit, werden in vergleichenden Studien meist nicht berücksichtigt (Stover 2003), was als limitierender Faktor für Vergleiche zu sehen ist und die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen manchen Studien erklären könnte.

Im Jahr 2006 beschloss das California Horse Racing Board, dass aus Sicherheitsgründen alle großen Rennvereine der USA eine synthetische Rennbahn errichten müssen (California Horse Racing Board 2006). Tatsächlich belegen mehrere Untersuchungen, dass diese Art Tretschicht die geringste Verletzungsrate für Rennpferde bedingt. So lag gemäß der Equine Injury Database (The Jockey Club 2023) im Zeitraum von 2009 bis 2022 die Inzidenz fataler Unfälle pro 1000 Rennstarts bei 1,11 für synthetische Böden, bei 1,42 für Grasböden und bei 1,86 für *Dirt-Tracks*. Die Inzidenzen nahmen seit Beginn der Beobachtungen für alle Böden ab, und im Jahr 2022 betrug die Inzidenz auf synthetischen Böden nur mehr 0,41. Während die Performance von Rennpferden über die Jahre weiter zunahm (Gardner 2006), wurde die Leistung durch synthetische Böden im Vergleich zu anderen Böden leicht negativ beeinflusst (Chateau et al. 2009a; Robin et al. 2009). Dies könnte mit dem erhöhten Energieaufwand zur Fortbewegung auf weicherem Boden zusammenhängen, sowie von der Steifigkeit der Oberfläche beeinflusst werden. Diese beeinflusst beim Menschen nachgewiesenermaßen die mögliche Maximalgeschwindigkeit (McMahon & Greene 1978). Zudem ist bei gleicher Geschwindigkeit die Schrittlänge der Pferde auf synthetischem Boden kürzer als auf Grasböden oder *Dirt-Tracks* (Thomason & Peterson 2008). Die geringere Verletzungsrate auf synthetischen Böden könnte mit deren geringerer Härte zusammenhängen, denn härterer Boden ist in der Literatur mit höherem Verletzungsrisiko assoziiert (Bailey et al. 1998; Williams et al. 2001; Parkin et al. 2004a,b; Crevier-Denoix et al. 2017b). Aus einer humanen Studie ist bekannt, dass ein gewisses Maß an Schock-Absorption durch die Oberfläche protektiv für Verletzungen wirkt, ab einem Wert von

ca. 70 % wurde aber kein zusätzlicher Schutz geboten und die Leistung wurde reduziert (Durá et al. 1999). In Schweden kam es bei Hürdenrennen zu mehr Stürzen bei langen Rennen, wenn der Boden sehr weich war, was jedoch auch durch Faktoren wie Ermüdung durch diese Böden hervorgerufen werden könnte (Gottlieb-Vedi & Pipper 2015). Insgesamt haben synthetische Böden im Vergleich zu Grasböden und *Dirt-Tracks* eine stärker dämpfende Wirkung auf die Kräfte der Fußung, was man in geringeren Kraft- und Bremsbeschleunigungsspitzen messen kann (Setterbo et al. 2009; Crevier-Denoix et al. 2009b). Die Werte der maximalen vertikalen Bodenreaktionskraft *in vivo* betragen für synthetische Böden laut Setterbo et al. (2013) z.B. nur 83 % der Werte für *Dirt-Tracks* und 71 % der Werte für Grasböden. Bei der Messung mit einem mechanischen Testapparat betragen die Werte für die maximale vertikale Bodenreaktionskraft, Steifigkeit und Kraftübertragungsrate nur jeweils 37–67 % der Werte eines *Dirt-Tracks*. Gerade die Kraft- und Beschleunigungsspitzen spielen eine große Rolle bei fatalen Verletzungen im Rennsport (Thomason & Peterson 2008). Bei der Kraftübertragung auf synthetischen Böden findet laut Setterbo et al. (2013) mehr elastische Deformation (229 %) im Vergleich zu *Dirt-Tracks* statt, sowie eine größere Energierückgewinnung (158 %). Die plastische Verformung unterschied sich nicht signifikant. Außerdem gibt es Hinweise auf eine protektive Wirkung vor Weichteilverletzungen, denn es findet eine gleichmäßigere Kraftübertragung auf die oberflächliche Beugesehne bei synthetischem im Vergleich zu reinem Sandboden statt, und die maximal wirkende Kraft auf der Sehne ist geringer (Crevier-Denoix et al. 2009a).

Für das Verhalten der Böden bei horizontal wirkenden Kräften ist aus mehreren Studien bekannt, dass das Kraftmaximum beim Abbremsen der Gliedmaße bis zum Stillstand auf synthetischem Boden geringer ist als auf Sand-, Grasböden oder *Dirt-Tracks*. Es trat außerdem zeitlich später ein (Setterbo et al. 2009, 2013; Robin et al. 2009; Symons et al. 2014). Die Scherkräfte innerhalb der Gliedmaße, die zum Verletzungspotential der Böden beitragen, werden durch diese Eigenschaften verringert. Die Studie von Rohlf et al. (2023b) fand keinen signifikanten Unterschied von Scherparametern zwischen *Dirt-Tracks* und synthetischen Böden ohne Wachsüberzug, jedoch waren diese vom Gehalt synthetischer Fasern, vom Feuchtigkeitsgehalt und von der Schichtdicke abhängig. Mittels kinematischer Analyse zeigten Symons et al. (2014), dass auf synthetischem Boden weniger Hyperextension im Fesselgelenk der Hintergliedmaßen im Galopp stattfindet. In einer weiteren kinematischen Untersuchung aller drei Bodenarten von Setterbo et al. (2008) zeigten sich Unterschiede in der Bewegung der Vordergliedmaße, die jedoch überwiegend zeitlich waren und weniger das Ausmaß der Gelenkwinkel betrafen. So wurden die maximalen Gelenkwinkel

auf Grasboden schneller erreicht und die maximalen Gelenkwinkel bei der Fußung waren bei Grasboden kleiner als auf synthetischer Oberfläche. Dies könnte Weichteilstrukturen der Gliedmaße beeinflussen und wird auf eine unterschiedliche Verformbarkeit der Böden zurückgeführt. In einer szintigrafischen Studie ließen Muster und Stärke des Knochenstoffwechsels im Humerus auf ein geringeres Frakturrisiko auf synthetischen Böden im Vergleich zu *Dirt-Tracks* schließen (Dimock et al. 2013). Die Häufigkeit, Art und Lokalisation von Verletzungen variieren mit verschiedenen Böden (Parkes & Witte 2015; Peterson et al. 2021). Auf *Dirt-Tracks* zeigte sich in einer Studie von Peterson et al. (2021) die größte Häufigkeit an Verletzungen der Vordergliedmaßen, auf Grasböden traten dagegen die meisten fatalen Frakturen der Hinterbeine auf. Die Studie von MacKinnon et al. (2015) zeigte durch szintigrafische Untersuchungen die meisten Stressfrakturen bei Pferden, die auf synthetischem Boden trainiert worden sind, gefolgt von *Dirt-Tracks* und Grasböden. Diese Studie diskutiert jedoch mehrere Limitationen, wie unterschiedliche Trainingsstrategien der Populationen und Anlässe zur szintigrafischen Untersuchung. Auf Sandböden zeigte sich insgesamt eine größere Häufigkeit von Kondylusfrakturen des Röhrlbeines im Vergleich zu Grasböden, während auf Grasböden Frakturen des Fesselbeines und des lateralen Röhrlbeinkondylus die häufigsten Pathologien waren. Proximale Sesambeinfrakturen sind auf synthetischen Böden und *Dirt-Tracks* die häufigste Pathologie (Mohammed et al. 1991; Peloso et al. 1994; Johnson et al. 1994; Hill 2003; Parkin et al. 2004c; Kristoffersen et al. 2010; Clegg 2011; Parkes & Witte 2015).

Hinsichtlich der Konstanz und Gleichmäßigkeit der Bodenbedingungen wurden mit dem OBST auf synthetischen Rennstrecken einheitlichere und konsistentere Messwerte über die Gesamtfläche gemessen als bei *Dirt-Tracks* (Marquardt 2014). Dies wird auf die bessere Resistenz gegen Schwankungen im Feuchtigkeitsgehalt zurückgeführt. Holt et al. (2014) schlossen aus einer Studie mit dem OBST und einem Clegg Hammer, dass ein Feuchtigkeitsgehalt von etwa 19 % und eine mittlere Substratdichte einen guten Kompromiss aus leistungsfördernden und Sicherheit schaffenden Eigenschaften für synthetische Böden bewirkten. Für *Dirt-Tracks* gilt, dass mehr Feuchtigkeit zu einer geringeren Energierückgewinnung an die Gliedmaße führt (Ratzlaff et al. 1997). Ein weiterer Faktor, der für die Entstehung von Erkrankungen des Bewegungsapparates relevant ist, sind die mechanischen Vibrationen des Bodens nach Kraftereinwirkung, die durch Ausmaß und Geschwindigkeit der elastischen Rückverformung entstehen. Setterbo et al. (2009) sowie Symons et al. (2014) fanden deutlich geringere Vibrationen (weniger als 70 %) bei synthetischen Böden im Vergleich zu Grasböden und *Dirt-Tracks*.

Eine japanische Studie bei Flachrennen zeigte außerdem, dass auch die Jockeys eine höhere

Verletzungsrate bei *Dirt-Tracks* im Vergleich zu Grasböden erlitten (Mizobe et al. 2021).

Geht es um Eigenschaften der Grasböden, sind die Studienergebnisse insgesamt inhomogener. Ryan et al. (2006), so wie Setterbo et al. (2009) fanden die größten Bremsbeschleunigungswerte bei Grasböden im Vergleich zu den anderen Rennbahnböden. Viele Studien zeigten eine geringere Verletzungsrate im Vergleich mit *Dirt-Tracks* (Mohammed et al. 1991; Stover 2003; Georgopoulos & Parkin 2016; The Jockey Club 2022), wenn auch nicht alle (Hernandez et al. 2001). In der Schweiz zeigten sich für Trabrennen auf Grasböden häufiger medizinische Probleme als auf Sandböden (Schweizer et al. 2016). Für Trabrennen gibt es jedoch keine weiteren Studien, die einen Vergleich ermöglichen. Im Vereinigten Königreich kam es bei Grasböden zu geringeren Verletzungsraten als auf synthetischen Böden (Williams et al. 2001; Henley et al. 2006; Rosanowski et al. 2017b). Dies gilt nicht nur für Frakturen, sondern auch für Sehnen- und Fesselträgerschäden, sowie Fesselgelenks- und Sesambeinerkrankungen. Das könnte möglicherweise durch feuchte britische Wetterverhältnisse erklärbar sein. Je feuchter die Erde, desto geringer die Härte und die Energierückgewinnung auf auftreffende Gliedmaßen (Ratzlaff et al. 1997, 2005). Auch die Scherfestigkeit und damit die Rutschigkeit (*Grip*) sind von der Feuchtigkeit abhängig, weshalb es z.B. üblich ist, auf feuchtem Grasboden Stolleneisen anzubringen und den *Grip* des Pferdes zu erhöhen (Harvey et al. 2012). Auf Grasboden dauert die *Breakover*-Phase des Hufes, beim Übergang von der Stützbein- zur Hangbeinphase, länger als auf synthetischen Böden (Horan et al. 2021a). Die Geschwindigkeit der Pferde, aber auch die Verletzungsrate sind auf feuchterem Grasboden geringer (Oikawa & Kusunose 2005). Genau Gegenteiliges zeigte sich für *Dirt-Tracks*. Inzwischen gibt es Konstruktionen von Grasböden mit darunterliegendem Drainagesystem, um den Wassergehalt besser kontrollieren zu können (Hickstead 2011). Grasböden zeigen bei gewissem Druck plastische Verformung, was eine Reduktion der Steifigkeit herbeiführen kann (Crevier-Denoix et al. 2015), jedoch auch zu einer Zerstörung der Wurzelstruktur führen kann. Verschiedene Arten an Erdmaterial, Graspflanzenarten und Wurzelstrukturen spielen ebenfalls eine Rolle für die Mechanik des Grasbodens. Zwischen den USA und Europa gibt es große Unterschiede in Nutzungsintensität und Pflege der Böden (Thomson & Mahaffey 2006), von welchen die Verletzungsrisiken ebenfalls abhängen (Mohammed et al. 1991; Oikawa et al. 1994). Für den im Rennsport nur selten eingesetzten Holzschnitzelboden fanden Moyer et al. (1991) eine geringere Verletzungsrate bei Pferden, die auf diesen Böden trainiert wurden, als bei Training auf *Dirt-Tracks*.

Für Englische oder andere Reitsportdisziplinen gibt es weitaus weniger Studien zu den verwendeten Böden oder Sammlungen epidemiologischer Daten.

Fatale Unfälle kommen weitaus seltener vor mit der höchsten Verletzungsrate im Geländeteil mehrtägiger Vielseitigkeitswettbewerbe, bei welchen die Inzidenz von Verletzungen 0,45 % je Start beträgt (Singer et al. 2008). Dennoch gibt es viele Sportart-typische Erkrankungen (Dyson 2002; Murray et al. 2010b; Parkes et al. 2013), wobei davon ausgegangen werden kann, dass deren Art und Inzidenz von Bodeneigenschaften beeinflusst wird (van Weeren 2010).

Im Dressursport werden dem Pferd versammelte, verstärkte, seitliche und auch rotierende (z.B. Pirouette) Bewegungen abverlangt. Der Boden soll jede Art dieser Bewegungen gut ermöglichen und ausreichend dämpfende Eigenschaften haben (Dyson 2002), hohe Scherfestigkeit für rapide Bewegungen und Richtungswechsel ist aber nicht vordergründig. Allgemein tun sich junge Dressurpferde meist auf etwas härterem Boden leichter. Es kommen meist Sandböden mit verschiedenen Beimengungen wie Gummi-, Holz- oder Textilbestandteilen zum Einsatz, manchmal auch Grasböden (Murray et al. 2010a; Hoffmann 2020; Egenvall et al. 2021). Gummibestandteile können kleine oder größere Partikel aus recycelten Autoreifen, Schläuchen oder anderen Ausgangsstoffen sein. Diese eignen sich gut, um die Dichte und Härte eines Bodens zu reduzieren (Malmgren et al. 1994) und die Elastizität zu erhöhen, was zu weniger Stolpern führt (Drevemo & Hjertèn 1991). Bei Holzschnitzelböden und reinem Sand verlieren Dressurpferde häufiger die Balance. Die Häufigkeit, mit den Hufen abzurutschen war auf reinen Holzschnitzelböden zwölfmal größer als auf Sandböden, wachsüberzogenen Böden oder Sandgemischen mit Gummi oder Plastik (Murray et al. 2010b). Wird reiner Sand verwendet, leistet das Pferd mehr Muskelarbeit zur Fortbewegung und passt den Vorführbogen an, was ebenfalls zu häufigerem Stolpern führt (Murray et al. 2010a). Synthetische Böden, wie sie für Rennstrecken beschrieben wurden, kommen auch im Dressursport zum Einsatz und bringen neben der größeren Resistenz gegen Feuchtigkeits- und Temperatureinflüsse auch Vorteile für die Trittsicherheit mit sich. Das Management des Feuchtigkeitsgehaltes und regelmäßiges Glätten sind wie auch im Rennsport für die Sicherheit auf Dressurplätzen essenziell. Bereits innerhalb eines Dressurwettbewerbes zeigen sich signifikante Änderungen in der Härte des Bodens (Blundell 2010). Synthetische Böden oder Sandböden mit Gummianteil führten laut Fragebogen zu weniger Lahmheiten und Verletzungen im Dressursport als reiner Sand, Sand mit PVC oder Holzschnitzeln, sowie Grasböden (Murray et al. 2010b). In einem Vergleich von Kruse et al. (2012) zeigte ein Sand-Sägespan-Gemisch die geringste Härte im Vergleich zu reinem Sand, Gras oder Sand mit Kunstfaser. Dies ist mit der besonders hohen elastischen Verformung der Sägespäne zu erklären. Sägespäne bewirken, wie auch synthetische Böden, nur weniger starke und niederfrequenzere Vibrationen (Barrey et al. 1991).

Eine Studie von Walker et al. (2017) untersuchte die Kinematik von Dressurpferden in versammeltem und Mitteltrab auf zwei Sandböden, wovon einer einen deutlich höheren Faser-/Gummianteil enthielt. Es zeigten sich keine Unterschiede der Gelenkwinkel zwischen den Böden.

Böden für den Springsport sind allgemein meist härter als die für Dressurarenen. Beim Bewältigen eines Sprunges muss genug Kraft für den Absprung aufgebracht werden, größere Kräfte bei der Landung gedämpft und mit mehr Scherfestigkeit schnelle Wendungen unterstützt werden. Typischerweise werden Grasböden oder Sandböden mit Kunstfaser verwendet (Hernlund et al. 2017). Holzschnitzel führen zu vermehrter Rutschigkeit, weshalb sie für den Springsport eher ungeeignet sind (Murray et al. 2010a). Gemische aus Sand und Holzfasern zeigten größere Beschleunigungsspitzen der Pferdehufe bei Absprung und Landung als Sand-Kunstfasergemische (Hernlund et al. 2013). Kruse et al. (2012) fanden mit accelerometrischen Messungen an Huf und Fesselgelenk die größte Härte bei einem Outdoor-Grasplatz, gefolgt von einem Outdoor-Sandplatz. Dies ähnelt den Ergebnissen von Ryan et al. (2006). Die Indoor-Böden, zwei Sand-Kunstfasermischungen und ein Sand-Sägespanboden (Dressurarena) waren weicher. Ein Beispiel für neue Technologien, die nun immer wieder im Springsport verwendet werden, ist die AirFibr® Technologie. Das Gras wächst hierbei auf einem künstlichen Substrat, welches resistenter gegenüber Schwankungen im Feuchtigkeitsgehalt, elastischer und schärfer als natürliche Erde sein soll. Mittels dynamometrischem Hufschuh wurden von Crevier-Denoix et al. (2015) die Eigenschaften bei Absprung und Landung des Springpferdes mit denen eines natürlichen Grasbodens verglichen. Es bestätigten sich eine größere Elastizität, geringere Vibrationen und geringere Kraftspitzen bei der Landung des Hufes auf den Boden. In der Mitte der Stützbeinphase war die Kraft jedoch größer. Durch die höhere Elastizität war der Schaden durch Hufabdrücke im Boden geringer im Vergleich zu herkömmlichem Grasboden.

Für wachshaltige, synthetische Böden im Springsport hat sich gezeigt, dass bei größerem Wachsgehalt (10 %) das Rutschen des Hufes bei der Landung geringer und konstanter ist, als bei Böden mit nur 3 % Wachsgehalt (Orlande et al. 2012).

Pferde im Vielseitigkeitssport sind der größten Vielfalt an Bodeneigenschaften ausgesetzt. Die Anforderungen im Geländeteil entsprechen ungefähr denen im Springsport, während zusätzlich Steigungen und Wasserflächen enthalten sind. Weichere Böden und sandigere Erden führten laut Skowronek und Hertsch (2003) zu weniger Ausfällen im Wettkampf als harte und lehmige Böden. Die Dressurwettkämpfe als Teil der Vielseitigkeit werden gelegentlich auf Grasboden ausgeführt, die für diese Verwendung vergleichsweise hart sind (Dyson 2002). Aktuell wurde eine breit angelegte

Studie zur Untersuchung von Geländestrecken mit mehreren Bodentestern durchgeführt, deren entwickeltes Testprotokoll wegweisend für zukünftige standardisierte Testungen sein könnte (Graydon et al. 2023).

Für andere Reitsportarten wie z.B. Westernreiten, Voltigieren oder Fahren gibt es noch so gut wie keine Untersuchungen zu geeigneten Böden. Je nach durchgeführten Lektionen, wie z.B. *Sliding Stops* bei der Western-Disziplin Reining, oder enge Wendungen in hoher Geschwindigkeit beim Barrel Racing, sollten die Scherfestigkeitsparameter entsprechend gewählt werden (Dabareiner et al. 2005). Spezieller Hufbeschlagnagel, wie z.B. Sliding Hufeisen (Arnold o.J.), beeinflussen die Ergebnisse der Lektionen.

Mittels Arbeit an der Longe untersuchten Chateau et al. (2013) den Einfluss von harten und weichen Oberflächen (Asphalt bzw. Sand-Faser-Gemisch) bei

Bewegung auf Kreislinien. Der weiche Boden führte zu einer Verringerung der Kraftspitzen, sowie zum schrägen Einsinken des Hufes in den Boden, was die Kraftverteilung im Huf mehr der Gliedmaßenachse angleicht. Somit wird extrasagittaler Stress auf die Gelenke und weitere Strukturen geringer. Im Vergleich zwischen Asphalt- und Sandböden zeigen sich kinematisch deutliche Änderungen des Bewegungsmusters, was verdeutlicht, dass man sich verschiedene Härtegrade z.B. für Rehabilitationsprogramme verletzter Pferde zunutze machen kann (Caure et al. 2021).

### Fazit für die Praxis:

Die Kenntnis spezifischer Eigenschaften und Verletzungsrisiken verschiedener Reitböden und Sportdisziplinen können sich praktizierende Tierärzt:innen zur schnelleren Diagnosefindung, sowie bei der Lahmheitsuntersuchung und Therapie orthopädischer Erkrankungen zunutze machen. In der Forschung und Anwendung ist derzeit die Zahl an verwendeten Bodenmessgeräten und gemessenen Parametern sehr groß und vielfältig. Die weitere Etablierung standardisierter Testverfahren wird ein wichtiger Schritt für die fortschreitende Optimierung von Reitböden sein, sodass in Zukunft die Möglichkeiten zur Prävention von Verletzungen im Pferdesport weiter verbessert werden, sowie eine weitere Steigerung an Effektivität für den jeweiligen Zweck ermöglicht wird.

### Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren erklären, dass kein Interessenkonflikt besteht.

## Literatur

- Aldahir PCF, McElroy JS. A Review of Sports Turf Research Techniques Related to Playability and Safety Standards. *J Agron*. 2014;106(4):1297–1308. DOI:10.2134/agronj13.0489
- Alexandrou A, Earl R. The Relationship among the Pre-compaction Stress, Volumetric Water Content and Initial Dry Bulk Density of Soil. *J Agric Eng Res*. 1998;71(1):75–80. DOI:10.1006/jaer.1998.0300
- Al-Shayea NA. The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. *Eng Geol*. 2001;62(4):319–342. DOI:10.1016/S0013-7952(01)00032-1
- American Society for Testing and Materials International. Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils: 2011 Edition 15.01.2011.
- Arnold D. Sliding Beschlag. o.J. [cited 2022 Dec 30]. Available from: <https://arnold-proshop.de/Sliding-Hufeisen/Sliding-Beschlag>.
- Australian Racecourse Managers Association Inc. Australian Racecourses National Track Standards. 2007 [cited 2023 Oct 31]. Available from: <https://agrifutures.com.au/wp-content/uploads/publications/07-159.pdf>.
- Back W, Pille F. The role of the hoof and shoeing. In: Back W, Clayton HM, eds. *Equine Locomotion*. 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier; 2013. p. 147–174.
- Bailey CJ, Reid SWJ, Hodgson DR, Bourke JM, Rose RJ. Flat, hurdle and steeple racing: risk factors for musculoskeletal injury. *Equine Vet J*. 1998;30(6):498–503.
- Bambi G, Rossi G, Barbari M. Comparison between different types of bedding materials for horses *Agronomy Research*. 2018;16(3):646–655. DOI:10.15159/ar.18.124
- Barrey E, Landjerit B, Wolter R. Shock and vibration during the hoof impact on different track surfaces. In: 3<sup>rd</sup> International Conference on Equine Physiology: 07.1991: Uppsala, Sweden. p. 97–106.
- Baxter GM, Stashak TS, Belknap JK, Parks A. Lameness in the Extremities: The Foot. In: Baxter GM, editor. *Adams and Stashak's Lameness in Horses*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc; 2020. p. 475–558.
- Becker K, Lewczuk D. Variability of Jump Biomechanics Between Horses of Different Age and Experience Using Commercial Inertial Measurement Unit Technology. *J Equine Vet Sci*. 2022;119:104–146. DOI:10.1016/j.jevs.2022.104146
- Belli A, Bui P, Berger A, Geysant A, Lacour J-R. A treadmill ergometer for three-dimensional ground reaction forces measurement during walking. *J Biomech*. 2001;34(1):105–112. DOI:10.1016/S0021-9290(00)00125-1
- Benetti M. FIFA Quality programme for football turf - Test manual 2 - Test requirements. 2022a [cited 2022 Dec 30]. Available from: <https://digitalhub.fifa.com/m/7e03cf23203765a2/original/>

- FIFA-quality-programme-for-football-turf-Test-Manual-II-Test-Requirements-2015v-3-4.pdf.
- Benetti M. FIFA Quality programme for football turf - Test manual I - Test methods. 2022b [cited 2022 Dec 30]. Available from: <https://digitalhub.fifa.com/m/f13b1cd18027f40/original/FIFA-quality-programme-for-football-turf-Test-Manual-I-Test-Methods-2015v-3-4.pdf>
- Benoit P, Barrey E, Regnault JC, Brochet JL. Comparison of the damping effect of different shoeing by the measurement of hoof acceleration. *Acta Anat (Basel)*. 1993;146(2–3):109–113. DOI:10.1159/000147430
- Blackburn S, Nicol A, Walker C. Development of a biomechanically validated turf testing rig. In: ISB XX<sup>th</sup> Congress - ASB 29<sup>th</sup> Annual Meeting; Cleveland, Ohio; 2005. p. 120.
- Blanco MA, Hourquebie R, Dempsey K, Schmitt P, Peterson MM. An Experimental Comparison of Simple Measurements Used for the Characterization of Sand Equestrian Surfaces. *Animals (Basel)*. 2021;11(10):2896. DOI:10.3390/ani11102896
- Blanco MA, Di Rado FN, Peterson M. Warm Season Turfgrass Equine Sports Surfaces: An Experimental Comparison of the Independence of Simple Measurements Used for Surface Characterization. *Animals (Basel)*. 2023;13(5):811. DOI:10.3390/ani13050811
- Blundell E. The effects of dressage competitions on the mechanical properties of a synthetic equestrian arena surface [Dissertation]; Lancashire (UK): University of Central Lancashire; 2010.
- Boden LA, Anderson GA, Charles JA, Morgan KL, Morton JM, Parkin TDH, et al. Risk factors for Thoroughbred racehorse fatality in flat starts in Victoria, Australia (1989-2004). *Equine Vet J*. 2007;39(5):430–437. DOI:10.2746/042516407X183162
- Bogossian PM, Di Filippo PA, Correia-Oliveira CR. Effect of race-track surface on glycolytic activity of trained endurance horses. *International Journal of Performance Analysis in Sport*. 2021;21(1):12–21. DOI:10.1080/24748668.2020.1842625
- Bridge JW, Peterson ML. Synthetic Racetrack Surfaces Temperature Changes. 2006 [cited 2022 Dec 30]. Available from: <https://www.racingsurfaces.org/bulletins.html>.
- Bridge JW, Peterson ML, McIlwraith CW. The Effect of Temperature on the Tangent Modulus of Granular Composite Sport Surfaces. *Exp Techniques*. 2015;39(4):30–37. DOI:10.1111/j.1747-1567.2012.00851.x
- Bridge JW, Yeung CH, Dempsey KM, Yoshizumi DA, Weisshaupt KS. Accelerated UV Aging of a Wax-Based Binder Used in Synthetic Granular Composite Equine Sports Surfaces. *J Test Eval*. 2022;50(1):20210042. DOI:10.1520/JTE20210042
- Bridge JW, Yeung CH, Liu C, Leonen E, Weisshaupt K, Dempsey KM. Material Characterization Testing of Synthetic Granular Composites Used in Equine Sports Surfaces. *J Test Eval*. 2023;51(2):20220091. DOI:10.1520/JTE20220091
- British Horseracing Authority. BHA General Instructions Section 3: The Racecourse. 2023 [cited 2023 Oct 31]. Available from: [http://media.britishhorseracing.com/bha/Rules/BHAGI/Section3\\_The\\_Racecourse.pdf](http://media.britishhorseracing.com/bha/Rules/BHAGI/Section3_The_Racecourse.pdf).
- Burn JF, Usmar SJ. Hoof landing velocity is related to track surface properties in trotting horses. *Equine Comp Exerc Physiol*. 2005;2(1):37–41. DOI:10.1079/ECP200542
- Butcher MT, Hermanson JW, Ducharme NG, Mitchell LM, Soderholm LV, Bertram JEA. Superficial digital flexor tendon lesions in racehorses as a sequela to muscle fatigue: a preliminary study. *Equine Vet J*. 2007;39(6):540–545. DOI:10.2746/042516407X212475
- California Horse Racing Board. California Code of Regulations: 2006 Rules and Regulations. Division 4, Article 3, Section 1433: Application for License to Conduct a Horse Racing Meeting. 2006
- Caple MCJ, James IT, Bartlett MD. Using the GoingStick to assess pitch quality. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*. 2013;227(2):83–90. DOI:10.1177/1754337112447268.
- Caure S, Mortagne P, Leveillard D, Blanville F, Carro M, Cousty M, et al. The Influence of Different Hind Shoes and Bare Feet on Horse Kinematics at a Walk and Trot on a Soft Surface. *J Equine Vet Sci*. 2018;70:76–83. DOI:10.1016/j.jevs.2018.08.002
- Caure S, Bonomelli N, Carro M, Leveillard D, Blanville F, Mortagne P, et al. Effects of sand, asphalt and 3-degree hind toe or heel elevation on horse kinematics. *Vet Rec*. 2021;188(4):e23. DOI:10.1002/vetr.23
- Chateau H, Robin D, Falala S, Pourcelot P, Valette JP, Ravary B, et al. Effects of a synthetic all-weather waxed track versus a crushed sand track on 3D acceleration of the front hoof in three horses trotting at high speed. *Equine Vet J*. 2009a;41(3):247–251. DOI:10.2746/042516409x394463
- Chateau H, Robin D, Simonelli T, Pacquet L, Pourcelot P, Falala S, et al. Design and validation of a dynamometric horseshoe for the measurement of three-dimensional ground reaction force on a moving horse. *J Biomech*. 2009b;42(3):336–340. DOI:10.1016/j.jbiomech.2008.11.017
- Chateau H, Holden L, Robin D, Falala S, Pourcelot P, Estoup P, et al. Biomechanical analysis of hoof landing and stride parameters in harness trotter horses running on different tracks of a sand beach (from wet to dry) and on an asphalt road. *Equine Vet J Suppl*. 2010(38):488–495. DOI:10.1111/j.2042-3306.2010.00277.x
- Chateau H, Camus M, Holden-Douilly L, Falala S, Ravary B, Vergari C, et al. Kinetics of the forelimb in horses circling on different ground surfaces at the trot. *Vet J*. 2013;198 Suppl 1:e20-6. DOI:10.1016/j.tvjl.2013.09.028
- Claußen G, Hessel EF. Particulate Matter in Equestrian Stables and Riding Arenas. *J Equine Vet Sci*. 2017;55:60–70. DOI:10.1016/j.jevs.2017.04.004
- Claußen G, Grau D, Hessel EF. Determination of the Moisture Content and the Generation of Airborne Particulate Matter From Various Types of Footing From Indoor Riding Arenas Considered to Have Optimal Rideability. *J Equine Vet Sci*. 2019a;79:113–120. DOI:10.1016/j.jevs.2019.05.024
- Claußen G, Dürselen R, Krone B, Hessel EF. Evaluation of the Factors Influencing the Rotational Shear Resistance of Horse Riding Arena Surfaces (Technical and Field Investigations). *J Equine Vet Sci*. 2019b;74:95–102. DOI:10.1016/j.jevs.2018.12.002
- Clayton HM, Hobbs SJ. Ground Reaction Forces: The Sine Qua Non of Legged Locomotion. *J Equine Vet Sci*. 2019;76:25–35. DOI:10.1016/j.jevs.2019.02.022
- Clegg B. An impact testing device for in situ base course evaluation. *Australian Road Research Board Conference Proc*. 1976;8(8):1–8.
- Clegg PD. Musculoskeletal disease and injury, now and in the future. Part 1: fractures and fatalities. *Equine Vet J*. 2011;43(6):643–649. DOI:10.1111/j.2042-3306.2011.00457.x
- Colborne GR, Routh JE, Weir KR, McKendry JE, Busschers E. Associations between hoof shape and the position of the frontal

- plane ground reaction force vector in walking horses. *N Z Vet J.* 2016;64(2):76–81. DOI:10.1080/00480169.2015.1068138
- Crevier-Denoix N, Pourcelot P, Ravary B, Robin D, Falala S, Valette J-P, et al. Non invasive measurement of equine superficial digital flexor tendon loading at high speed trot on different track surfaces. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2008;11(sup001):67–68. DOI:10.1080/10255840802296616
- Crevier-Denoix N, Pourcelot P, Ravary B, Robin D, Falala S, Uzel S, et al. Influence of track surface on the equine superficial digital flexor tendon loading in two horses at high speed trot. *Equine Vet J.* 2009a;41(3):257–261. DOI:10.2746/042516409x394445
- Crevier-Denoix N, Robin D, Pourcelot P, Ravary B. The sequisolo project: biomechanical evaluation of the effects of equestrian track surfaces on the equine locomotor system. 2009b [cited 2023 Oct 31]. Available from: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordid=fr20210160348>.
- Crevier-Denoix N, Camus M, Falala S, Ravary-Plumioen B, Douilly- Holden L, Robin D, et al. External loads on the leading and trailing forelimbs of a jumping horse at landing measured with a dynamometric horseshoe. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2013a;16 Suppl 1:145–146. DOI:10.1080/10255842.2013.815981
- Crevier-Denoix N, Falala S, Holden-Douilly L, Camus M, Martino J, Ravary-Plumioen B, et al. Comparative kinematic analysis of the leading and trailing forelimbs of horses cantering on a turf and a synthetic surface. *Equine Vet J Suppl.* 2013b;45:54–61. DOI:10.1111/evj.12160
- Crevier-Denoix N, Ravary-Plumioen B, Vergari C, Camus M, Holden-Douilly L, Falala S, et al. Comparison of superficial digital flexor tendon loading on asphalt and sand in horses at the walk and trot. *Vet J.* 2013c;198 Suppl 1:e130-136. DOI:10.1016/j.tvjl.2013.09.047
- Crevier-Denoix N, Munoz-Nates F, van Hamme A, Camus M, Emond A-L, Jerbi H, et al. Biomechanical comparison between hybrid turf ('AirFibr' technology) and natural turf at landing after hurdle jumping in one horse. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2015;18 Suppl 1:1916–1917. DOI:10.1080/10255842.2015.1069566
- Crevier-Denoix N, Munoz-Nates F, Camus M, Ravary-Plumioen B, Denoix JM, Pourcelot P, et al. Comparison of peak vertical force and vertical impulse in the inside and outside hind limbs in horses circling on a soft surface, at trot and canter. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2017a;20(sup1):51–52. DOI:10.1080/10255842.2017.1382856
- Crevier-Denoix N, Audigié F, Emond A-L, Dupays A-G, Pourcelot P, Desquillet L, et al. Effect of track surface firmness on the development of musculoskeletal injuries in French Trotters during four months of harness race training. *Am J Vet Res.* 2017b;78(11):1293–1304. DOI:10.2460/ajvr.78.11.1293
- Cust ARE, Anderson GA, Whitton RC, Davies HMS. Hoof conformation and performance in the racing Thoroughbred in Macau. *Aust Vet J.* 2013;91(3):108–112. DOI:10.1111/avj.12012
- Dabareiner RM, Cohen ND, Carter GK, Nunn S, Moyer W. Musculoskeletal problems associated with lameness and poor performance among horses used for barrel racing: 118 cases (2000-2003). *J Am Vet Med Assoc.* 2005;227(10):1646–1650. DOI:10.2460/javma.2005.227.1646
- Dahl VE, Hitchens PL, Stover SM. Effects of racetrack surface and nail placement on movement between heels of the hoof and horseshoes of racehorses. *Am J Vet Res.* 2016;77(9):983–990. DOI:10.2460/ajvr.77.9.983
- Davie AL, Evans DJ. Blood lactate responses to submaximal field exercise tests in thoroughbred horses. *Vet J.* 2000;159(3):252–258. DOI:10.1053/tvjl.1999.0420
- Dekel S, Weissman SL. Joint Changes after Overuse and Peak Overloading of Rabbit Knees In Vivo. *Acta Orthop Scand.* 1978;49(6):519–528. DOI:10.3109/17453677808993232
- Dimock AN, Hoffman KD, Puchalski SM, Stover SM. Humeral stress remodelling locations differ in Thoroughbred racehorses training and racing on dirt compared to synthetic racetrack surfaces. *Equine Vet J.* 2013;45(2):176–181. DOI:10.1111/j.2042-3306.2012.00596.x
- Dixon CR, McWilliams L, Erfinder; Turf Diagnostics & Design, Inc, PatentInhaber. Turf Impact Analysis System. United States Patent US005736631A. 07.04.1998.
- Dohms-Warnecke T, Düe M, Hertsch B. Grundwissen zur Haltung, Fütterung, Gesundheit und Zucht. 20<sup>th</sup> ed. Warendorf: FN-Verlag der Deutschen Reiterlichen Vereinigung GmbH; 2021.
- Drevemo S, Hjertèn G. Evaluation of a shock absorbing woodchip layer on a harness racetrack. *Equine Exerc Physiol.* 1991;3:107–112.
- Drevemo S, Hjertèn G, Johnston C. Drop hammer tests of Scandinavian harness racetracks. *Equine Vet J.* 1994;26(S17):35–38. DOI:10.1111/j.2042-3306.1994.tb04870.x
- Dufour MJD, Mumford C. The Development and Environmental Applications of the Goingstick. In: Fuss F, Subic AJ, Ujihashi S, editors. *The Impact of Technology on Sport II.* CRC Press; 2007. p. 195–200. DOI:10.1201/9781439828427-28
- Dufour MJD, Mumford C. GoingStick® technology and electromagnetic induction scanning for naturally-turfed sports surfaces. *Sports Technol.* 2008;1(2–3):125–131. DOI:10.1002/jst.27
- Durá JV, Hoyos JV, Lozano L, Martínez A. The effect of shock absorbing sports surfaces in jumping. *Sports Eng.* 1999;2(2):103–108. DOI:10.1046/j.1460-2687.1999.00025.x
- Dyhre-Poulsen P, Smedegaard HH, Roed J, Korsgaard E. Equine hoof function investigated by pressure transducers inside the hoof and accelerometers mounted on the first phalanx. *Equine Vet J.* 1994;26(5):362–366. DOI:10.1111/j.2042-3306.1994.tb04404.x
- Dyson S. Lameness and poor performance in the sport horse: Dressage, show jumping and horse trials. *J Equine Vet Sci.* 2002;22(4):145–150. DOI:10.1016/S0737-0806(02)70139-1
- Dyson S, Greve L. Subjective Gait Assessment of 57 Sports Horses in Normal Work: A Comparison of the Response to Flexion Tests, Movement in Hand, on the Lunge, and Ridden. *J Equine Vet Sci.* 2016;38:1–7. DOI:10.1016/j.jevs.2015.12.012
- Egenvall A, Roepstorff L, Peterson M, Lundholm M, Hernlund E. The Descriptions and Attitudes of Riders and Arena Owners to 656 Equestrian Sport Surfaces in Sweden. *Front Vet Sci.* 2021;8:798910. DOI:10.3389/fvets.2021.798910
- Evans DL, Walsh JS. Effect of increasing the banking of a racetrack on the occurrence of injury and lameness in standardbred horses. *Aust Vet J.* 1997;75(10):751–752. DOI:10.1111/j.1751-0813.1997.tb12261.x
- Evans GP, Behiri JC, Vaughan LC, Bonfield W. The response of equine cortical bone to loading at strain rates experienced in vivo by the galloping horse. *Equine Vet J.* 1992;24(2):125–128. DOI:10.1111/j.2042-3306.1992.tb02796.x
- Firth EC, Rogers CW, Doube M, Jopson NB. Musculoskeletal responses of 2-year-old Thoroughbred horses to early training. 6. Bone

- parameters in the third metacarpal and third metatarsal bones. *N Z Vet J.* 2005;53(2):101–112. DOI:10.1080/00480169.2005.36487
- Fredricson I, Dalin G, Drevemo S, Hjertén G, Alm LO. A Biotechnical Approach to the Geometric Design of Racetracks. *Equine Vet J.* 1975;7(2):91–96. DOI:10.1111/j.2042-3306.1975.tb03240.x
- Gardner DS. Historical progression of racing performance in the Thoroughbred horse and man. *Equine Vet J.* 2006;38(6):581–583. DOI:10.2746/042516406x156514
- Georgopoulos SP, Parkin TDH. Risk factors associated with fatal injuries in Thoroughbred racehorses competing in flat racing in the United States and Canada. *J Am Vet Med Assoc.* 2016;249(8):931–939. DOI:10.2460/javma.249.8.931
- German Institute for Standardization. Surfaces for sports areas - determination of shock absorption 2005. EN 14808. Berlin: Beuth.
- Gottlieb-Vedi M, Pipper CB. Falls in Swedish hurdle and steeplechase racing and the condition of the track surface. *Comparative Exercise Physiology.* 2015;11(2):127–131. DOI:10.3920/CEP150011
- Grace J, Russel G. The Effect of Wind on Grasses. *J Exp Bot.* 1977;28(2):268–278. DOI:10.1093/jxb/28.2.268
- Graydon R, Northrop AJ, Martin JH, Lucey M, Schramel JP, Peham C, et al. The Development of a Standardized Protocol for Quantifying Equestrian Eventing Cross-Country Ground. *Biomechanics.* 2023;3:343–361. DOI:10.3390/biomechanics3030029
- Gündemir O, Olğun Erdikmen D, Parkan Yaramış Ç. Evaluation of the stance phases of warmblood sport horses on soft and hard surfaces by infrared optical sensors. *Vet arhiv.* 2021;91(2):109–116. DOI:10.24099/vet.arhiv.0907
- Guisasola I, James I, Stiles V, Dixon S. Dynamic behaviour of soils used for natural turf sports surfaces. *Sports Eng.* 2010;12(3):111–122. DOI:10.1007/s12283-010-0036-1
- Gustås P, Johnston C, Roepstorff L, Drevemo S. In vivo transmission of impact shock waves in the distal forelimb of the horse. *Equine Vet J Suppl.* 2001(33):11–15. DOI:10.1111/j.2042-3306.2001.tb05350.x
- Hagen J, Hüppler M, Geiger SM, Mäder D, Häfner FS. Modifying the Height of Horseshoes: Effects of Wedge Shoes, Studs, and Rocker Shoes on the Phalangeal Alignment, Pressure Distribution, and Hoof-Ground Contact During Motion. *J Equine Vet Sci.* 2017;53:8–18. DOI:10.1016/j.jevs.2017.01.014
- Hagen J, Bos R, Brouwer J, Lux S, Jung FT. Influence of trimming, hoof angle and shoeing on breakover duration in sound horses examined with hoof-mounted inertial sensors. *Vet Rec.* 2021;189(4):e450. DOI:10.1002/vetr.450
- Hagen J, Brouwer J, Lux S, Weiske F, Jung FT. Characteristics of Hoof Landing in Sound Horses and the Influence of Trimming and Shoeing Examined With Hoof-Mounted Inertial Sensors. *J Equine Vet Sci.* 2023;128:104866. DOI:10.1016/j.jevs.2023.104866
- Harrison SM, Whitton RC, Stover SM, Symons JE, Cleary PW. A Coupled Biomechanical-Smoothed Particle Hydrodynamics Model for Horse Racing Tracks. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022;10:766748. DOI:10.3389/fbioe.2022.766748
- Harvey AM, Williams SB, Singer ER. The effect of lateral heel studs on the kinematics of the equine digit while cantering on grass. *Vet J.* 2012;192(2):217–221. DOI:10.1016/j.tvjl.2011.06.003
- Heleski C, Stowe CJ, Fiedler J, Peterson ML, Brady C, Wickens C, et al. Thoroughbred Racehorse Welfare through the Lens of 'Social License to Operate' — With an Emphasis on a U.S. Perspective. *Sustainability.* 2020;12(5):1706. DOI:10.3390/su12051706
- Henderson AJZ. Don't fence me in: managing psychological well being for elite performance horses. *J Appl Anim Welf Sci.* 2007;10(4):309–329. DOI:10.1080/10888700701555576
- Henley WE, Rogers K, Harkins L, Wood JLN. A comparison of survival models for assessing risk of racehorse fatality. *Prev Vet Med.* 2006;74(1):3–20. DOI:10.1016/j.prevetmed.2006.01.003
- Herholz C, Siegwart J, Nussbaum M, Studer MH-P, Burgos S. Large Temporal Variations of Functional Properties of Outdoor Equestrian Arena Surfaces and a New Concept of Evaluating Reactivity With Light Weight Deflectometer Settlement Curves. *J Equine Vet Sci.* 2023;129:104909. DOI: 10.1016/j.jevs.2023.104909
- Hernandez J, Hawkins DL, Scollay MC. Race-start characteristics and risk of catastrophic musculoskeletal injury in Thoroughbred racehorses. *J Am Vet Med Assoc.* 2001;218(1):83–86. DOI:10.2460/javma.2001.218.83
- Hernlund E, Egenvall A, Peterson ML, Mahaffey CA, Roepstorff L. Hoof accelerations at hoof-surface impact for stride types and functional limb types relevant to show jumping horses. *Vet J.* 2013;198 Suppl 1:e27-32. DOI:10.1016/j.tvjl.2013.09.029
- Hernlund E, Egenvall A, Hobbs SJ, Peterson ML, Northrop AJ, Bergh A, et al. Comparing subjective and objective evaluation of show jumping competition and warm-up arena surfaces. *Vet J.* 2017;227:49–57. DOI:10.1016/j.tvjl.2017.09.001
- Hickstead. The grass is greener. 2011 [cited 2022 Dec 30]. Available from: <https://www.hickstead.co.uk/news/2011/new-beginnings-the-grass-is-greener/>.
- Hill AE, Stover SM, Gardner IA, Kane AJ, Whitcomb MB, Emerson AG. Risk factors for and outcomes of noncatastrophic suspensory apparatus injury in Thoroughbred racehorses. *J Am Vet Med Assoc.* 2001;218(7):1136–1144. DOI:10.2460/javma.2001.218.1136
- Hill W. Survey of injuries in Thoroughbreds at The New York Racing Association tracks. *Clinical Techniques in Equine Practice.* 2003;2(4):323–328. DOI:10.1053/j.ctep.2004.04.004
- Hinterhofer C, Stanek C, Binder K. Elastic modulus of equine hoof horn, tested in wall samples, sole samples and frog samples at varying levels of moisture. *Berl Munch Tierarztl Wochenschr.* 1998;111(6):217–221.
- Hobbs SJ, Licka T, Polman R. The difference in kinematics of horses walking, trotting and cantering on a flat and banked 10 m circle. *Equine Vet J.* 2011;43(6):686–694. DOI:10.1111/j.2042-3306.2010.00334.x
- Hobbs SJ, Northrop AJ, Mahaffey C, Martin JH. Equine Surfaces White Paper: White Paper on Equine Arena Surface Assessment. 2014 [cited 2023 Oct 31]. Available from: [https://clock.uclan.ac.uk/11343/2/11343\\_hobbs.pdf](https://clock.uclan.ac.uk/11343/2/11343_hobbs.pdf)
- Hoffmann G. Pferdehaltung, Ställe und Reitanlagen: Orientierungshilfen für Bau und Modernisierung. 1st ed. FN-Verlag der Deutschen Reiterlichen Vereinigung GmbH; 2020.
- Holden-Douilly L, Pourcelot P, Desquillet L, Falala S, Crevier-Denoix N, Chateau H. Equine hoof slip distance during trot at training speed: comparison between kinematic and accelerometric measurement techniques. *Vet J.* 2013;197(2):198–204. DOI:10.1016/j.tvjl.2013.02.004
- Holt D, Northrop A, Owen A, Martin J, Hobbs SJ. Use of Surface Testing Devices to Identify Potential Risk Factors for Synthetic Equestrian Surfaces. *Procedia Engineering.* 2014;72:949–954. DOI:10.1016/j.proeng.2014.06.160

- Horan K, Coburn J, Kourdache K, Day P, Harborne D, Brinkley L, et al. Influence of Speed, Ground Surface and Shoeing Condition on Hoof Breakover Duration in Galloping Thoroughbred Racehorses. *Animals (Basel)*. 2021a;11(9):2588. DOI:10.3390/ani11092588
- Horan K, Kourdache K, Coburn J, Day P, Brinkley L, Carnall H, et al. Jockey Perception of Shoe and Surface Effects on Hoof-Ground Interactions and Implications for Safety in the Galloping Thoroughbred Racehorse. *J Equine Vet Sci*. 2021b;97:103327. DOI:10.1016/j.jevs.2020.103327
- Horan K, Kourdache K, Coburn J, Day P, Carnall H, Harborne D, et al. The effect of horseshoes and surfaces on horse and jockey centre of mass displacements at gallop. *PLoS One*. 2021c;16(11):e0257820. DOI:10.1371/journal.pone.0257820
- Horan K, Coburn J, Kourdache K, Day P, Carnall H, Brinkley L, et al. Hoof Impact and Foot-Off Accelerations in Galloping Thoroughbred Racehorses Trialling Eight Shoe-Surface Combinations. *Animals (Basel)*. 2022;12(17):2161. DOI:10.3390/ani12172161
- Horsereading Integrity and Safety Authority. HISA Safety Racetrack Rules. 2022 [cited 2022 Dec 30]. Available from: <https://static1.squarespace.com/static/604f6ab712afe14e11227976/t/6298ae4d1a5fb15f8c4371e9/1654173261721/2000.Safety+Rules.Fed+Register.rules.pdf>.
- Hotchkiss JW, Reid SWJ, Christley RM. A survey of horse owners in Great Britain regarding horses in their care. Part 1: Horse demographic characteristics and management. *Equine Vet J*. 2007;39(4):294–300. DOI:10.2746/042516407x177538
- Hüppler M, Hagen J, Häfner FS, Geiger SM, Mäder D. Examination of the pressure force distribution affecting the hoof and its influence-ability by different ground properties. *PHK*. 2015;31(5):426–434. DOI:10.21836/PEM20150501
- Johnson BJ, Stover SM, Daft BM, Kinde H, Read DH, Barr BC. Causes of death in racehorses over a 2 year period. *Equine Vet J*. 1994;26(4):327–330.
- Johnston C, Back W. Hoof ground interaction: when biomechanical stimuli challenge the tissues of the distal limb. *Equine Vet J*. 2006;38(7):634–641. DOI:10.2746/042516406x158341
- Kai M, Takahashi T, Aoki O, Oki H. Influence of rough track surfaces on components of vertical forces in cantering thoroughbred horses. *Equine Vet J Suppl*. 1999(30):214–217. DOI:10.1111/j.2042-3306.1999.tb05220.x
- Kai M, Aoki O, Hiraga A, Oki H, Tokuriki M. Use of an instrument sandwiched between the hoof and shoe to measure vertical ground reaction forces and three-dimensional acceleration at the walk, trot, and canter in horses. *Am J Vet Res*. 2000;61(8):979–985. DOI:10.2460/ajvr.2000.61.979
- Kane AJ, Stover SM, Gardner IA, Case JT, Johnson BJ, Read DH, et al. Horseshoe characteristics as possible risk factors for fatal musculoskeletal injury of thoroughbred racehorses. *Am J Vet Res*. 1996;57(8):1147–1152.
- Kim SY, Lee J-S, Kim D-J, Byun Y-H. Comparative Study on Estimation Methods of Dynamic Resistance Using Dynamic Cone Penetrometer. *Sensors (Basel)*. 2021;21(9):3985. DOI:10.3390/s21093085
- Kristoffersen M, Parkin TDH, Singer ER. Catastrophic biaxial proximal sesamoid bone fractures in UK Thoroughbred races (1999–2004): horse characteristics and racing history. *Equine Vet J*. 2010;42(5):420–424. DOI:10.1111/j.2042-3306.2010.00079.x
- Kruse L, Traulsen I, Krieter J. Effects of Different Riding Surfaces on the Hoof- and Fetlock-acceleration of Horses. *JAS*. 2012;4(5):17–24. DOI:10.5539/jas.v4n5p17
- Kruse L, Traulsen I, Krieter J. The Use of a Technical Device for Testing the Sport-Functional Properties of Riding Surfaces. *J Equine Vet Sci*. 2013;33(7):539–546. DOI:10.1016/j.jevs.2012.08.008
- Lanovaz JL, Clayton HM, Watson LG. In vitro attenuation of impact shock in equine digits. *Equine Vet J Suppl*. 1998;(26):96–102.
- Lawson SEM, Chateau H, Pourcelot P, Denoix J-M, Crevier-Denoix N. Effect of toe and heel elevation on calculated tendon strains in the horse and the influence of the proximal interphalangeal joint. *J Anat*. 2007;210(5):583–591. DOI:10.1111/j.1469-7580.2007.00714.x
- Lewis K, Northrop AJ, Crook GM, Mather J, Martin JH, Holt D, et al. Comparison of equipment used to measure shear properties in equine arena surfaces. *Biosyst Eng*. 2015;137:43–54. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2015.07.006
- Li J, Qubain BS. Resilient Modulus Variations with Water Content. In: *Symposium on Resilient Modulus Testing for Pavement: Resilient modulus testing for pavement components*. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2003:59–69. DOI:10.1520/STP12522S
- Librado P, Khan N, Fages A, Kusliy MA, Suchan T, Tonasso-Calvière L, et al. The origins and spread of domestic horses from the Western Eurasian steppes. *Nature*. 2021;598(7882):634–640. DOI:10.1038/s41586-021-04018-9
- MacKinnon MC, Bonder D, Boston RC, Ross MW. Analysis of stress fractures associated with lameness in Thoroughbred flat racehorses training on different track surfaces undergoing nuclear scintigraphic examination. *Equine Vet J*. 2015;47(3):296–301. DOI:10.1111/evj.12285
- Mactaggart G, Waran N, Phillips CJC. Identification of Thoroughbred Racehorse Welfare Issues by Industry Stakeholders. *Animals (Basel)*. 2021;11(5):135. DOI:10.3390/ani11051358
- Maeda Y, Tomioka M, Hanada M, Oikawa M. Influence of Track Surface Condition on Racing Times of Thoroughbred Racehorses in Flat Races. *J Equine Vet Sci*. 2012;32(11):689–695. DOI:10.1016/j.jevs.2012.02.012
- Mahaffey CA, Peterson ML, Roepstorff L. The effects of varying cushion depth on dynamic loading in shallow sand thoroughbred horse dirt racetracks. *Biosyst Eng*. 2013;114(2):178–186. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2012.12.004
- Mahaffey CA, Peterson ML, Thomason JJ, McIlwraith CW. Dynamic testing of horseshoe designs at impact on synthetic and dirt Thoroughbred racetrack materials. *Equine Vet J*. 2016;48(1):97–102. DOI:10.1111/evj.12360
- Malekipour F, Oetomo D, Lee PV-S. Equine subchondral bone failure threshold under impact compression applied through articular cartilage. *J Biomech*. 2016;49(10):2053–2059. DOI:10.1016/j.jbiomech.2016.05.016
- Malekipour F, Whitton CR, Lee PV-S. Stiffness and energy dissipation across the superficial and deeper third metacarpal subchondral bone in Thoroughbred racehorses under high-rate compression. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2018;85:51–56. DOI:10.1016/j.jmbbm.2018.05.031
- Malmgren R, Shideler RK, Butler KD, Anderson EW. The effect of polymer and rubber particles on arena soil characteristics. *J Equine Vet Sci*. 1994;14(1):38–42. DOI:10.1016/S0737-0806(07)80312-1

- Marquardt L. Is this the death of synthetic racing? And if so, why? 2014 [cited 2022 Dec 30]. Available from: <https://www.thoroughbreddailynews.com/pdf/magazine/Synthetics-Aug2014.pdf>.
- Marunova E, Hoenecke K, Fiske-Jackson A, Smith R KW, Bolt DM, Perrier M, et al. Changes in Head, Withers, and Pelvis Movement Asymmetry in Lamé Horses as a Function of Diagnostic Anesthesia Outcome, Surface and Direction. *J Equine Vet Sci.* 2022;118:104136. DOI:10.1016/j.jevs.2022.104136
- Mathew S, Chawla SL, Agnihotri R. Recent Advances in Turf Management. *Commercial Horticulture.* 2016:549–561.
- McGill S, Hayes M, Tumlin K, Coleman R. Characterization of indoor arenas through an anonymous survey. *Transl Anim Sci.* 2021;5(4):txab198. DOI:10.1093/tas/txab198
- McGill SE, Hayes M, Power K, Peterson M, Coleman R. Determining Moisture Content in Equine Arena Footing On-farm. In: ASABE, editor. 2022 ASABE Annual International Meeting; 17.–20.07.2022; Houston, Texas. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers; 2022. DOI:10.13031/aim.202200654
- McMahon TA, Greene PR. Fast running tracks. *Sci Am.* 1978;239(6):148–163. DOI:10.1038/scientificamerican1278-148
- McNitt AS, Waddington DV, Middour RO. Traction measurement on natural turf. ASTM Special Technical Publication. 1997;1305:145–155.
- Meershoek LS, van den Bogert AJ, Schamhardt HC. Model formulation and determination of in vitro parameters of a noninvasive method to calculate flexor tendon forces in the equine forelimb. *Am J Vet Res.* 2001;62(10):1585–1593. DOI:10.2460/ajvr.2001.62.1585
- Mendez-Angulo JL, Firshman AM, Groschen DM, Kieffer PJ, Trumble TN. Impact of walking surface on the range of motion of equine distal limb joints for rehabilitation purposes. *Vet J.* 2014;199(3):413–418. DOI:10.1016/j.tvjl.2013.12.001
- Miki G. The construction of new type sand track on the basis of soil engineering. *Soils and Foundations.* 1960;1(2):38–49. DOI:10.3208/sandf1960.1.2\_38
- Mizobe F, Takahashi Y, Kusano K. Risk Factors for Jockey Falls in Japanese Thoroughbred Flat Racing. *J Equine Vet Sci.* 2021;106:103749. DOI:10.1016/j.jevs.2021.103749
- Mohammadi SD, Nikoudel MR, Rahimi H, Khamehchiyan M. Application of the Dynamic Cone Penetrometer (DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils. *Engineering Geology.* 2008;101:195–203.
- Mohammed HO, Hill T, Lowe J. Risk factors associated with injuries in thoroughbred horses. *Equine Vet J.* 1991;23(6):445–448. DOI:10.1111/j.2042-3306.1991.tb03758.x
- Mooney SJ, Baker SW. The effects of grass cutting height and pre-match rolling and watering on football pitch ground cover and playing quality. *J Turfgrass Sci.* 2000;76:70–77.
- Morrice-West AV, Hitchens PL, Walmsley EA, Whitton RC. Track Surfaces Used for Ridden Workouts and Alternatives to Ridden Exercise for Thoroughbred Horses in Race Training. *Animals (Basel).* 2018. DOI:10.3390/ani8120221
- Mouloodi S, Rahmanpanah H, Gohari S, Burvill C, Tse KM, Davies HMS. What can artificial intelligence and machine learning tell us? A review of applications to equine biomechanical research. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2021;123:104728. DOI:10.1016/j.jmbm.2021.104728
- Moyer W, Spencer PA, Kallish M. Relative incidence of dorsal metacarpal disease in young Thoroughbred racehorses training on two different surfaces. *Equine Vet J.* 1991;23(3):166–168.
- Munoz-Nates F, Pourcelot P, van Hamme A, Martinot J, Pauchard M, Nouvel M, et al. Comparison between Clegg Impact Soil Tester and hoof impact shock measurements on 13 surfaces used for training trotters or sport horses. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2017;20(sup1):145–146. DOI:10.1080/10255842.2017.1382903
- Murphy J. Weighted boots influence performance in show-jumping horses. *Vet J.* 2009;181(1):74–76. DOI:10.1016/j.tvjl.2009.03.015
- Murray RC, Walters J, Snart H, Dyson S, Parkin T. How do features of dressage arenas influence training surface properties which are potentially associated with lameness? *Vet J.* 2010a;186(2):172–179. DOI:10.1016/j.tvjl.2010.04.026
- Murray RC, Walters JM, Snart H, Dyson SJ, Parkin TDH. Identification of risk factors for lameness in dressage horses. *Vet J.* 2010b;184(1):27–36. DOI:10.1016/j.tvjl.2009.03.020
- Nagy A, Murray JK, Dyson SJ. Horse-, rider-, venue- and environment-related risk factors for elimination from Fédération Equestre Internationale endurance rides due to lameness and metabolic reasons. *Equine Vet J.* 2014;46(3):294–299. DOI:10.1111/evj.12170
- New Zealand Thoroughbred Racing. Track Ratings. 2022. [cited 2023 Oct 31] Available from: <https://loveracing.nz/OnHorseFiles/Downloads/Track%20Ratings%202022%20V3.pdf>
- Ninomiya S, Aoyama M, Ujiie Y, Kusunose R, Kuwano A. Effects of bedding material on the lying behavior in stabled horses. *J Equine Sci.* 2008;19(3):53–56. DOI:10.1294/jes.19.53
- Northrop AJ, Dagg L-A, Martin JH, Brigden CV, Owen AG, Blundell EL, et al. The effect of two preparation procedures on an equine arena surface in relation to motion of the hoof and metacarpophalangeal joint. *Vet J.* 2013;198 Suppl 1:e137–42. DOI:10.1016/j.tvjl.2013.09.048
- Northrop AJ, Hobbs SJ, Holt D, Clayton-Smith E, Martin JH. Spatial Variation of the Physical and Biomechanical Properties Within an Equestrian Arena Surface. *Procedia Engineering.* 2016;147:866–871. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.288
- Northrop AJ, Martin JH, Holt D, Hobbs SJ. Operational temperatures of all-weather thoroughbred racetracks influence surface functional properties. *Biosyst Eng.* 2020;193:37–45. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2020.02.003
- Northrop AJ, Martin JH, Peterson ML, Roepstorff L, Herlund E, Hobbs SJ. The Challenges of Equestrian Arena Surfaces: The Unprecedented Use of a Raised Platform at the 2012 Olympic Games. *J Equine Vet Sci.* 2022;109:103838. DOI:10.1016/j.jevs.2021.103838
- Özen D, Kaya U, Özen H, Ambarcioğlu P, Ünal N, Gürçan İS. Investigation of Factors Influencing Thoroughbred Horses' Racing Career Length in Turkey. *J Equine Vet Sci.* 2021;107:103782. DOI:10.1016/j.jevs.2021.103782
- Oikawa M, Ueda Y, Inada S, Tsuchikawa T, Kusano H, Takeda A. Effect of restructuring of a racetrack on the occurrence of racing injuries in thoroughbred horses. *J Equine Vet Sci.* 1994;14(5):262–268. DOI:10.1016/S0737-0806(06)81951-9
- Oikawa M, Inada S, Fujisawa A, Yamakawa H, Asano M. The use of a racetrack hardness measurement system. *Equine Pract.* 2000;22(4):26–30.
- Oikawa M, Kusunose R. Fractures sustained by racehorses in Japan during flat racing with special reference to track condition

- and racing time. *Vet J.* 2005;170(3):369–374. DOI:10.1016/j.tvjl.2004.08.004
- Oosterlinck M, Pille F, Huppel T, Gasthuys F, Back W. Comparison of pressure plate and force plate gait kinetics in sound Warmbloods at walk and trot. *Vet J.* 2010;186(3):347–351. DOI:10.1016/j.tvjl.2009.08.024
- Oosterlinck M, Royaux E, Back W, Pille F. A preliminary study on pressure-plate evaluation of forelimb toe-heel and mediolateral hoof balance on a hard vs. a soft surface in sound ponies at the walk and trot. *Equine Vet J.* 2014;46(6):751–755. DOI:10.1111/evj.12210
- Orchard J. Is there a relationship between ground and climatic conditions and injuries in football? *Sports Med.* 2002;32(7):419–432. DOI:10.2165/00007256-200232070-00002
- Orlande O, Hobbs SJ, Martin JH, Owen AG, Northrop AJ. Measuring hoof slip of the leading limb on jump landing over two different equine arena surfaces. *Comp Exerc Physiol.* 2012;8(1):33–39. DOI:10.3920/CEP11011
- Pagliara E, Pasinato A, Valazza A, Riccio B, Cantatore F, Terzini M, et al. Multibody Computer Model of the Entire Equine Forelimb Simulates Forces Causing Catastrophic Fractures of the Carpus during a Traditional Race. *Animals (Basel)* 2022. DOI:10.3390/ani12060737
- Parkes RS, Richard Newton J, Dyson SJ. An investigation of risk factors for foot-related lameness in a United Kingdom referral population of horses. *Vet J.* 2013;196(2):218–225. DOI:10.1016/j.tvjl.2012.09.006
- Parkes RSV, Witte TH. The foot-surface interaction and its impact on musculoskeletal adaptation and injury risk in the horse. *Equine Vet J.* 2015;47(5):519–525. DOI:10.1111/evj.12420
- Parkes RSV, Pfau T, Weller R, Witte TH. The effect of curve running on distal limb kinematics in the Thoroughbred racehorse. *PLoS One.* 2020;15(12):e0244105. DOI:10.1371/journal.pone.0244105
- Parkin TDH, Clegg PD, French NP, Proudman CJ, Riggs CM, Singer ER, et al. Race- and course-level risk factors for fatal distal limb fracture in racing Thoroughbreds. *Equine Vet J.* 2004a;36(6):521–526. DOI:10.2746/0425164044877332
- Parkin TDH, Clegg PD, French NP, Proudman CJ, Riggs CM, Singer ER, et al. Risk factors for fatal lateral condylar fracture of the third metacarpus/metatarsus in UK racing. *Equine Vet J.* 2004b;37(3):192–199. DOI:10.2746/0425164054530641
- Parkin TDH, Clegg PD, French NP, Proudman CJ, Riggs CM, Singer ER, et al. Risk of fatal distal limb fractures among Thoroughbreds involved in the five types of racing in the United Kingdom. *Vet Rec.* 2004c;154(16):493–497. DOI:10.1136/vr.154.16.493
- Peham C, Schramel JP. Vorrichtung zur Bestimmung der elastischen Eigenschaften von Oberflächen und Böden und Verfahren zum Betrieb der Vorrichtung. *European Patent Office EP 3045890 A1.* 16.01.2015.
- Peloso JG, Mundy GD, Cohen ND. Prevalence of, and factors associated with, musculoskeletal racing injuries of thoroughbreds. *J Am Vet Med Assoc.* 1994;204(4):620–626.
- Peterson ML, McIlwraith CW. Effect of track maintenance on mechanical properties of a dirt racetrack: a preliminary study. *Equine Vet J.* 2008;40(6):602–605. DOI:10.2746/042516408x330347
- Peterson ML, McIlwraith CW, Reiser RF. Development of a system for the in-situ characterisation of thoroughbred horse racing track surfaces. *Biosystems Engineering.* 2008;101(2):260–269. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2008.07.007
- Peterson ML, Reiser RF, Kuo P-H, Radford DW, McIlwraith CW. Effect of temperature on race times on a synthetic surface. *Equine Vet J.* 2010;42(4):351–357. DOI:10.1111/j.2042-3306.2010.00072.x
- Peterson ML, Roepstorff L, Thomason JJ, Mahaffey CA, McIlwraith CW. Racing Surfaces: Current progress and future challenges to optimize consistency and performance of track surfaces for fewer horse injuries. 2012 [cited 2022 Dec 31]. Available from: [http://www.grayson-jockeyclub.org/resources/White\\_Paper\\_final.pdf](http://www.grayson-jockeyclub.org/resources/White_Paper_final.pdf).
- Peterson M, Sanderson W, Kussainov N, Hobbs SJ, Miles P, Scollay MC, et al. Effects of Racing Surface and Turn Radius on Fatal Limb Fractures in Thoroughbred Racehorses. *Sustainability.* 2021;13(2):539. DOI:10.3390/su13020539
- Pfau T, Persson-Sjodin E, Gardner H, Orssten O, Hernelund E, Rhodin M. Effect of Speed and Surface Type on Individual Rein and Combined Left-Right Circle Movement Asymmetry in Horses on the Lunge. *Front Vet Sci.* 2021;8:692031. DOI:10.3389/fvets.2021.692031
- Pinnington HC, Dawson B. The energy cost of running on grass compared to soft dry beach sand. *J Sci Med Sport.* 2001;4(4):416–430. DOI:10.1016/S1440-2440(01)80051-7
- Pourcelot P, Defontaine M, Ravary B, Lemâtre M, Crevier-Denoix N. A non-invasive method of tendon force measurement. *J Biomech.* 2005;38(10):2124–2129. DOI:10.1016/j.jbiomech.2004.09.012
- Pratt GW. Model for injury to the foreleg of the Thoroughbred racehorse. *Equine Vet J.* 1997;23 (Suppl):30–32. DOI:10.1111/j.2042-3306.1997.tb05048.x.
- Pringle MM, Erfinder; United States Golf Association, Patentinhaber. Device and method for measuring the impact properties of a sport field surface. *United States Patent US 7.243,526 B2.* 17.06.2007.
- Radin E, Paul I, Rose R. Role of mechanical factors in pathogenesis of primary osteoarthritis. *The Lancet.* 1972;299(7749):519–522. DOI:10.1016/S0140-6736(72)90179-1
- Ramsuchit E. Stall Mat Preference in Miniature Horses [Undergraduate Research Thesis]. *Ohio: Ohio State University;* 2015.
- Ratzlaff MH, Hyde ML, Hutton DV, Rathgeber RA, Balch OK. Interrelationships between moisture content of the track, dynamic properties of the track and the locomotor forces exerted by galloping horses. *J Equine Vet Sci.* 1997;17(1):35–42.
- Ratzlaff MH, Wilson PD, Hutton DV, Slinker BK. Relationships between hoof-acceleration patterns of galloping horses and dynamic properties of the track. *Am J Vet Res.* 2005;66(4):589–595. DOI:10.2460/ajvr.2005.66.589
- Ravary B, Pourcelot P, Bortolussi C, Konieczka S, Crevier-Denoix N. Strain and force transducers used in human and veterinary tendon and ligament biomechanical studies. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2004;19(5):433–447. DOI:10.1016/j.clinbiomech.2004.01.008
- Ravary-Plumiöen B, Pourcelot P, Vergari C, Desquilbet L, Crevier-Denoix N. Effects of ground surface on the equine superficial digital flexor tendon loading at the walk and trot. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2012;15 Suppl 1:143–144. DOI:10.1080/10255842.2012.713733
- Reilly PT, van Eps A, Stefanovski D, Pfau T. The influence of different horseshoes and ground substrates on mid-stance hoof orientation at the walk. *Equine Vet J.* 2023;1–9. DOI:10.1111/evj.13990

- Reiser RF, Raoul F, Peterson ML, McIlwraith CW, Woodward B. Simulated effects of racetrack material properties on the vertical loading of the equine forelimb. *Sports Eng.* 2000;3(1):1–11. DOI:10.1046/j.1460-2687.2000.00049.x
- Riemersma DJ, van den Bogert AJ, Jansen MO, Schamhardt HC. Tendon strain in the forelimbs as a function of gait and ground characteristics and in vitro limb loading in ponies. *Equine Vet J.* 1996;28(2):133–138. DOI:10.1111/j.2042-3306.1996.tb01605.x
- Riggs CM. Clinical problems in dressage horses: identifying the issues and comparing them with knowledge from racing. *Vet J.* 2010;184(1):1–2. DOI:10.1016/j.tvjl.2009.07.027
- Robin D, Chateau H, Pacquet L, Falala S, Valette JP, Pourcelot P, et al. Use of a 3D dynamometric horseshoe to assess the effects of an all-weather waxed track and a crushed sand track at high speed trot: preliminary study. *Equine Vet J.* 2009;41(3):253–256. DOI:10.2746/042516409x397965
- Roepstorff L, Johnston C, Drevemo S. The effect of shoeing on kinetics and kinematics during the stance phase. *Equine Vet J Suppl.* 1999;(30):279–285. DOI:10.1111/j.2042-3306.1999.tb05235.x
- Rogers CW, Bolwell CF, Gee EK, Peterson ML, McIlwraith CW. Profile and Surface Conditions of New Zealand Thoroughbred Racetracks. *J Equine Vet Sci.* 2014;34(9):1105–1109. DOI:10.1016/j.jevs.2014.06.017
- Rogers JN, Vanini JT, Crum JR. Simulated traffic on turfgrass top-dressed with crumb rubber. *TurfGrass Trends.* 1998;7(7):11–14.
- Rohlf CM, Garcia TC, Fyhrie DP, Le Jeune SS, Peterson ML, Stover SM. Arena surface vertical impact forces vary with surface compaction. *Vet J.* 2023a;105955. DOI:10.1016/j.tvjl.2023.105955
- Rohlf CM, Garcia TC, Fyhrie DP, Le Jeune SS, Peterson ML, Stover SM. Shear ground reaction force variation among equine arena surfaces. *Vet J.* 2023b;291:105930. DOI:10.1016/j.tvjl.2022.105930
- Roland ES, Hull ML, Stover SM. Design and demonstration of a dynamometric horseshoe for measuring ground reaction loads of horses during racing conditions. *J Biomech.* 2005;38(10):2102–2112. DOI:10.1016/j.jbiomech.2004.08.024
- Rollot Y, Lecuyer E, Chateau H, Crevier-Denoix N. Development of a 3D model of the equine distal forelimb and of a GRF shoe for noninvasive determination of in vivo tendon and ligament loads and strains. *Equine Vet J.* 2004;36(8):677–682.
- Rosanowski SM, Chang YM, Stirk AJ, Verheyen KLP. Descriptive epidemiology of veterinary events in flat racing Thoroughbreds in Great Britain (2000 to 2013). *Equine Vet J.* 2017a;49(3):275–281. DOI:10.1111/evj.12592
- Rosanowski SM, Chang YM, Stirk AJ, Verheyen KLP. Risk factors for race-day fatality, distal limb fracture and epistaxis in Thoroughbreds racing on all-weather surfaces in Great Britain (2000 to 2013). *Prev Vet Med.* 2017b;148:58–65. DOI:10.1016/j.prevetmed.2017.10.003
- Rose-Harvey K, McInnes KJ, Thomas JC. Water Flow Through Sand-based Root Zones Atop Geotextiles. *HortScience.* 2012;47(10):1543–1547. DOI:10.21273/HORTSCI.47.10.1543
- Rosenkranz H, Durner W, He W, Knoblauch C, Meurer KHE. Ringversuch zum Praxisvergleich von 13 Sensor-Typen zur Wassergehalts- und Wasserspannungsbestimmung in Böden. In: Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft, editor. 15. Gumpensteiner Lysimetertagung; Raumberg-Gumpenstein. Irdning; 2013. p. 93–102.
- Ross MW. Movement: Surface Characteristics and Lameness Examination. In: Ross MW, Dyson SJ, editors. *Diagnosis and Management of Lameness in the Horse.* 2<sup>nd</sup> ed. Saint Louis: W.B. Saunders; 2011. p. 66.
- Ryan CT, Schaer BLD, Nunamaker DM. A novel wireless data acquisition system for the measurement of hoof accelerations in the exercising horse. *Equine Vet J.* 2006;38(7):671–674. DOI:10.2746/042516406x156361
- Salo Z, Thomason JJ, Runciman RJ. Analysis of strain and stress in the equine hoof using finite element analysis: Comparison with minimum principal strains recorded in vivo. 2010;107(3):262–270.
- Santamaría S, Bobbert ME, Back W, Barneveld A, van Weeren PR. Variation in free jumping technique within and among horses with little experience in show jumping. *Am J Vet Res.* 2004;65(7):938–944. DOI:10.2460/ajvr.2004.65.938
- Schamhardt HC, Merckens HW. Quantification of equine ground reaction force patterns. *J Biomech.* 1987;20(4):443–446. DOI:10.1016/0021-9290(87)90051-0
- Schamhardt HC, Merckens HW. Objective determination of ground contact of equine limbs at the walk and trot: comparison between ground reaction forces, accelerometer data and kinematics. *Equine Vet J.* 1994;26(S17):75–79. DOI:10.1111/j.2042-3306.1994.tb04879.x
- Schnabel L. Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Reitbahnböden durch Zuschlagstoffe (Bindenrandschnitte) [Diplomarbeit]. Wien: Veterinärmedizinische Universität Wien; 2018.
- Schweizer C, Ramseyer A, Gerber V, Christen G, Burger D, Wohlfender FD. Retrospective evaluation of all recorded horse race starts in Switzerland during a four year period focusing on discipline-specific risk factors for clinical events. *Equine Vet J.* 2016;48(6):697–703. DOI:10.1111/evj.12515
- Self ZT, Spence AJ, Wilson AM. Speed and incline during Thoroughbred horse racing: racehorse speed supports a metabolic power constraint to incline running but not to decline running. *J Appl Physiol* (1985). 2012;113(4):602–607. DOI:10.1152/jappphysiol.00560.2011
- Self Davies ZT, Spence AJ, Wilson AM. Ground reaction forces of overground galloping in ridden Thoroughbred racehorses. *J Exp Biol.* 2019;222(16):jeb204107. DOI:10.1242/jeb.204107
- Serink MT, Nachemson A, Hansson G. The effect of impact loading on rabbit knee joints. *Acta Orthop Scand.* 1977;48(3):250–262. DOI:10.3109/17453677708988764
- Setterbo J, Garcia T, Campbell I, Kim S, Hubbard M, Stover S. Forelimb Kinematics of Galloping Thoroughbred Racehorses Measured on Dirt, Synthetic, and Turf Track Surfaces (P235). In: Estivalet M, Brisson P, editors. *The Engineering of Sport 7.* Paris: Springer Paris; 2008. p. 437–446. DOI:10.1007/978-2-287-09413-2\_54
- Setterbo JJ, Garcia TC, Campbell IP, Reese JL, Morgan JM, Kim SY, et al. Hoof accelerations and ground reaction forces of Thoroughbred racehorses measured on dirt, synthetic, and turf track surfaces. *Am J Vet Res.* 2009;70(10):1220–1229. DOI:10.2460/ajvr.70.10.1220
- Setterbo JJ, Yamaguchi A, Hubbard M, Upadhyaya SK, Stover SM. Effects of equine racetrack surface type, depth, boundary area, and harrowing on dynamic surface properties measured using a track-testing device in a laboratory setting. *Sports Eng.* 2011;14(2-4):119–137. DOI:10.1007/s12283-011-0073-4

- Setterbo JJ, Fyhrie PB, Hubbard M, Upadhyaya SK, Stover SM. Dynamic properties of a dirt and a synthetic equine racetrack surface measured by a track-testing device. *Equine Vet J.* 2013;45(1):25–30. DOI:10.1111/j.2042-3306.2012.00582.x
- Shaktivesh S, Malekipour F, Whitton RC, Hitchens PL, Lee PV. Fatigue behavior of subchondral bone under simulated physiological loads of equine athletic training. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2020;110:103920. DOI:10.1016/j.jmbbm.2020.103920
- Shearman RC, Beard JB. Turfgrass Wear Tolerance Mechanisms: I. Wear Tolerance of Seven Turfgrass Species and Quantitative Methods for Determining Turfgrass Wear Injury. *Agronomy J.* 1975;67(2):208–211. DOI:10.2134/agronj1975.00021962006700020009x
- Singer E, Garcia T, Stover S. How do metacarpophalangeal joint extension, collateromotion and axial rotation influence dorsal surface strains of the equine proximal phalanx at different loads in vitro? *J Biomech.* 2013;46(4):738–744. DOI:10.1016/j.jbiomech.2012.11.028
- Singer E, Garcia T, Stover S. Hoof position during limb loading affects dorsoproximal bone strains on the equine proximal phalanx. *J Biomech.* 2015;48(10):1930–1936. DOI:10.1016/j.jbiomech.2015.04.014
- Singer ER, Barnes J, Saxby F, Murray JK. Injuries in the event horse: training versus competition. *Vet J.* 2008;175(1):76–81. DOI:10.1016/j.tvjl.2006.11.009
- Skowronek H, Hertsch B. Influence of surface conditions at three day events on the number of horses retiring. *PHK.* 2003;19(3):253–262. DOI:10.21836/PEM20030303
- Snow VE. The Reined Cow Horse: Distal Interphalangeal Joint Pain. In: Ross MW, Dyson SJ, editors. *Diagnosis and Management of Lameness in the Horse.* 2<sup>nd</sup> ed. Saint Louis: W.B. Saunders; 2011. p. 1176–1180.
- Stiles V, James I, Dixon S, Guisasola I. Natural Turf Surfaces. The Case for Continued Research. *Sports Med.* 2009;39:65–84. DOI:10.2165/00007256-200939010-00005
- Stover SM. The epidemiology of Thoroughbred racehorse injuries. *Clin Techniques in Equine Practice.* 2003;2(4):312–322. DOI:10.1053/j.ctep.2004.04.003
- Stover SM, Murray A. The California Postmortem Program: leading the way. *Vet Clin North Am Equine Pract.* 2008;24(1):21–36. DOI:10.1016/j.cveq.2007.11.009
- Stubbs AK, Neylan JJ. *Racetrack Management - A Manual for Racecourse Managers.* RIRDC Publication No W02/002. 2002. [cited 2023 Oct 31]. Available from: [http://89.44.122.121/data/\\_uploaded/file/Racetrack-Management-Manual.pdf](http://89.44.122.121/data/_uploaded/file/Racetrack-Management-Manual.pdf)
- Stutz JC, Vidondo B, Ramseyer A, Maninchedda UE, Cruz AM. Effect of three types of horseshoes and unshod feet on selected non-podal forelimb kinematic variables measured by an extremity mounted inertial measurement unit sensor system in sound horses at the trot under conditions of treadmill and soft geotextile surface exercise. *Vet Rec Open.* 2018;5(1):e000237. DOI:10.1136/vetreco-2017-000237
- Symons JE, Garcia TC, Stover SM. Distal hindlimb kinematics of galloping Thoroughbred racehorses on dirt and synthetic race-track surfaces. *Equine Vet J.* 2014;46(2):227–232. DOI:10.1111/evj.12113
- Symons JE, Fyhrie DP, Hawkins DA, Upadhyaya SK, Stover SM. Modeling equine race surface vertical mechanical behaviors in a musculoskeletal modeling environment. *J Biomech.* 2015;48(4):566–572. DOI:10.1016/j.jbiomech.2015.01.006
- Symons JE, Hawkins DA, Fyhrie DP, Upadhyaya SK, Stover SM. Hitting the ground running: Evaluating an integrated racehorse limb and race surface computational model. *J Biomech.* 2016a;49(9):1711–1717. DOI:10.1016/j.jbiomech.2016.03.057
- Symons JE, Hawkins D, Fyhrie D, Upadhyaya S, Stover S. Modelling the Interaction Between Racehorse Limb and Race Surface. *Procedia Engineering.* 2016b;147:175–180. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.209
- Symons JE, Hawkins DA, Fyhrie DP, Upadhyaya SK, Stover SM. Modelling the effect of race surface and racehorse limb parameters on in silico fetlock motion and propensity for injury. *Equine Vet J.* 2017;49(5):681–687. DOI:10.1111/evj.12672
- The Jockey Club. The Jockey Club Releases Data from the Equine Injury Database for 2021. 2022 [cited 2022 Dec 31]. Available from: [https://jockeyclub.com/pdfs/eid\\_13\\_year\\_tables.pdf](https://jockeyclub.com/pdfs/eid_13_year_tables.pdf).
- The Jockey Club. Supplemental Tables of Equine Injury Database Statistics for Thoroughbreds. 2023 [cited 2023 Oct 31]. Available from: [https://jockeyclub.com/pdfs/eid\\_14\\_year\\_tables.pdf](https://jockeyclub.com/pdfs/eid_14_year_tables.pdf).
- Thomas VJ, Murphy JW, Field TRO. Racetrack Traction Assessment by Penetrometer Part I. The Model. *Journal of Turfgrass Management.* 1996;1(4):37–49. DOI:10.1300/J099v01n04\_04
- Thomason JJ, McClinchey HL, Jofriet JC. Analysis of strain and stress in the equine hoof capsule using finite element methods: comparison with principal strains recorded in vivo. *Equine Vet J.* 2002;34(7):719–725. DOI:10.2746/042516402776250388
- Thomason JJ, Peterson ML. Biomechanical and mechanical investigations of the hoof-track interface in racing horses. *Vet Clin North Am Equine Pract.* 2008;24(1):53–77. DOI:10.1016/j.cveq.2007.11.007
- Thomson TR, Mahaffey CA. Predicting horse performance on turf using three commercially available monitoring tools. 2006 [cited 2022 Dec 31]. Available from: <https://www.racingsurfaces.org/bulletins.html>.
- Tranquille CA, Walker VA, Hernelund E, Egenvall A, Roepstorff L, Peterson ML, et al. Effect of superficial harrowing on surface properties of sand with rubber and waxed-sand with fibre riding arena surfaces: a preliminary study. *Vet J.* 2015;203(1):59–64. DOI:10.1016/j.tvjl.2014.10.027
- van der Heijden R, Benoît J, Hawe W. Response Characteristics of Engineered Equestrian Surfaces: A Case Study. In: Stuedlein AW, Lemnitzer A, Suleiman MT, editors. *IFCEE 2018; 05.-10.03.2018; Orlando, Florida.* Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers: American Society of Civil Engineers; 2018. p. 80–93. DOI:10.1061/9780784481592.009
- van Huylenbroek JM, van Bockstaele E. Effects of shading on photosynthetic capacity and growth of turfgrass species. *Int Turfgrass Soc Res Journal.* 2001;9:353–359.
- van Weeren PR. On surfaces and soreness. *Vet J.* 2010;186(2):129–130. DOI:10.1016/j.tvjl.2010.09.006
- Vasco ACCdM, Dubeux JCB, Wallau MO, Wickens CL, Warren LK. Characterization of Forage Utilization and Pasture Management Practices on Florida Horse Operations. *J Equine Vet Sci.* 2020;95:103253. DOI:10.1016/j.jevs.2020.103253
- Vos NJ, Riemersma DJ. Determination of coefficient of friction between the equine foot and different ground surfaces: an in

- vitro study. *Equine Comp Exerc Physiol.* 2006;3(4):191–198. DOI:10.1017/S1478061506617234
- Waldern NM, Wiestner T, Peinen K von, GómezAlvarez CG, Roepstorff L, Johnston C, et al. Influence of different head-neck positions on vertical ground reaction forces, linear and time parameters in the unriden horse walking and trotting on a treadmill. *Equine Vet J.* 2009;41(3):268–273. DOI:10.2746/042516409x397389
- Walker VA, Tranquille CA, Roepstorff L, Landolt C, Brandham J, Murray RC. The Effect of Harrowing and Watering on Arena Surface Characteristics and Kinematics of the Working Trot. In: British Equine Veterinary Association, Editor. Proceedings of the 51<sup>st</sup> British Equine Veterinary Association Congress 2012; 12.-15.09.2012; Birmingham, United Kingdom. p. 159.
- Walker VA, Tranquille CA, Newton JR, Dyson SJ, Brandham J, Northrop AJ, et al. Comparison of limb kinematics between collected and lengthened (medium/extended) trot in two groups of dressage horses on two different surfaces. *Equine Vet J.* 2017;49(5):673–680. DOI:10.1111/evj.12661
- Wang T, Zeng Y, Ma C, Meng J, Wang J, Ren W, et al. Plasma Non-targeted Metabolomics Analysis of Yili Horses Raced on Tracks With Different Surface Hardness. *J Equine Vet Sci.* 2023;121:104197. DOI:10.1016/j.jevs.2022.104197
- Weimar KR, Pichlbauer B, Guse C, Schramel JP, Peham C, Drillich M, et al. Evaluation of an Accelerometer-Based Device for Testing the Softness of Bedding Materials Used for Livestock. *Sensors (Basel).* 2022; 22(22):8912. DOI:10.3390/s22228912
- Weishaupt MA, Hogg HP, Wiestner T, Denoth J, Stüssi E, Auer JA. Instrumented treadmill for measuring vertical ground reaction forces in horses. *Am J Vet Res.* 2002;63(4):520–527. DOI:10.2460/ajvr.2002.63.520
- Willemsen MA, Savelberg HHCM, Barneveld A. The improvement of the gait quality of sound trotting warmblood horses by normal shoeing and its effect on the load on the lower forelimb. *Livest Prod Sci.* 1997;52:145–153.
- Williams RB, Harkins LS, Hammond CJ, Wood JL. Racehorse injuries, clinical problems and fatalities recorded on British racecourses from flat racing and National Hunt racing during 1996, 1997 and 1998. *Equine Vet J.* 2001;33(5):478–486. DOI:10.2746/042516401776254808
- Witte TH, Knill K, Wilson AM. Determination of peak vertical ground reaction force from duty factor in the horse (*Equus caballus*). *J Exp Biol.* 2004;207(21):3639–3648. DOI:10.1242/jeb.01182
- Zamparo P, Perini R, Orizio C, Sacher M, Ferretti G. The energy cost of walking or running on sand. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1992;65(2):183–187. DOI:10.1007/BF00705078
- Zebarth BJ, Lee D, Kay BD. Impact resistance of three soils under varying moisture and subzero temperature conditions. *Can Geotech J.* 1984;21(3):449–455. DOI:10.1139/t84-049
- Zhang J, Baker SW. Sand characteristics and their influence on the physical properties of rootzone mixes used for sports turf. *Journal of Turfgrass Science.* 1999;75:66–73.

**Please cite as:**

Hruza J, Peham C. Objektive Messverfahren zur Bestimmung von Reitbodeneigenschaften und deren Einfluss auf den Bewegungsapparat des Pferdes – Ein Überblick. *Wien Tierärztl Monat – Vet Med Austria.* 2023;110:Doc11. DOI: 10.5680/wtm000025

Copyright ©2023 Hruza and Peham. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License. See license information at <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>